



IBPSA (International Building Performance Simulation Association) / Chile - Argentina - Brazil

5° Congreso Sudamericano de Simulación de Edificios / 27-28 septiembre  
2018 / Valparaíso (Chile)

## Libro de Artículos

### **EDITORES**

**Massimo Palme**  
**Danny Lobos**  
**Carlos Robles**

ISBN: 978-956-398-316-6



## COMITÉ ORGANIZADOR:

Danny Lobos

Claudio Carrasco

Diego Ibarra

Massimo Palme

Carlos Robles

## COMITÉ CIENTÍFICO:

Sergio Vera

Waldo Bustamante

José Guerra

Halimi Sulaiman

Roberto Lamberts

Beatriz Piderit

Raul Ajmat

Denis Riquelme

Andres Schwarz

Facundo Bre

Lorena Córlica

Ricardo Alzugaray

Ana Paula Melo

Martín Ordenes

Miguel Ángel Gálvez



**002:** *La influencia del usuario en el comportamiento térmico de una vivienda con ventilación natural nocturna.*

Soledad Andreoni, Carolina Ganem

**003:** *Predicción del comportamiento térmico y energético de un proyecto de bodega. Resiliencia y adaptación al cambio climático.*

Carolina Ganem, Gustavo Barea

**004:** *Simulación paramétrica de desempeño energético y costo social para centros de salud primaria cero-energía en Chile.*

Alberto Nope, Rodrigo García

**007:** *Simulación energética paramétrica. Análisis de los parámetros influyentes en las cargas energéticas.*

María Victoria Mercado, Gustavo Barea, Alfredo Esteves

**008:** *Las implicancias para simulaciones de energía de la certificación GBC Zero Energy*

Pablo Antonio Hidalgo

**009:** *Impacto del desempeño energético de la vivienda unifamiliar actual bajo escenarios futuros del cambio climático.*

Natalia González, Paulina Wegertseder

**010:** *Evaluación de la calidad acústica de aulas escolares en establecimientos educacionales municipales*

Guiselle Arroyo, Paulina Wegertseder

**014:** *Validación de modelo microclimático calculado con ENVI-met como herramienta para el análisis térmico edilicio de Energy Plus.*

Julieta Balter, Noelia Alchapar, Érica Correa, Carolina Ganem

**015:** *The state of art of the existing tools for buildings retrofitting.*

Alex González, Muriel Díaz

**017:** *Simulación del intercambio energético en edificios mediante fuentes extensas.*

Lorenzo Muro, Ioseph Cabeza

**023:** *Potencial de edificaciones residenciales de mediana altura para cumplir estándar de energía neta cero en diferentes climas de Chile*

Felipe Tori, Sergio Vera, Waldo Bustamante, Pablo Sills

**024:** *Desempeño térmico de ventanas doble vidrio que incorporan materiales con cambio de fase.*

Daniel Uribe, Sergio Vera, Nicolás Benavente, Waldo Bustamante

**026:** *Análise comparativa do desempenho higratérmico de vedações verticais em cal-cânhamo, concreto e madeira com isolamento de celulose.*

Carolina Rodrigues Dal Soglio, Martín Ordenes



**027:** *Calibração e convergência do Método Transiente de Seções Finitas para Transwalls delgadas de diferentes espessuras.*

Yuri Piffer, Saulo Güths, Martín Ordenes

**028:** *Desenvolvimento de modelo genérico para avaliação do impacto de dispositivos de sombreamento na ventilação natural*

Michele Marta Rossi, Fernanda Itkes, Alessandra Rodriguez, Karin Soares

**030:** *Iluminação natural em salas de aula: estudo de caso no semiárido brasileiro*

Lilianne De Queiroz, Lucía Aires

**031:** *Análise da influência da geometria do edifício na distribuição de coeficientes de pressão em um edifício isolado: simulação CFD*

Marieli Azoia Lukiantchuki, Alessandra Prata, Fernando Marques de Silva, Rosana Maria Caram

**034:** *Simulación del comportamiento energético de edificios en entornos urbanos*

Massimo Palme, Agnese Salvati, Claudio Carrasco

**036:** *Desenvolvimento de metamodelos para a avaliação do nível de eficiência energética da envoltória em edificações residenciais*

Ana Paula Melo, Roberto Lamberts

**037:** *Optimización multi-objetivo de estrategias de eficiencia energética en un campamento minero existente en la Cordillera de los Andes.*

Annelore Dietz, Sergio Vera

**038:** *Simulação computacional do desempenho do conforto térmico de edifício escolar em Brasília – Brasil*

Jessica Lara, Teciana Xavier, Caio Silva

**039:** *A influência do comportamento do usuário em habitações de interesse social em clima quente e úmido.*

Andreia Cardoso de Oliveira, Solange Leder, Celina Pinto

**042:** *Evaluación de Estrategias de Iluminación y Ventilación Natural en etapas tempranas del proceso de diseño de un Edificio de Oficinas en Talca, Chile*

Matías Tapia, Carolina Espinoza, Humberto Fuentes

**043:** *Ferramenta computacional para a verificação da viabilidade econômica de soluções racionais em relação ao uso da água em edificações*

André Barcellos, Joao Luiz, Jorge Aching, Ricardo Gonçalves

**046:** *Morfología arquitectónica y uso potencial de energías renovables a escala urbana y de edificios.*

Raul Ajmat, María Victoria Longhini, José Sandoval



**050:** *Análisis de capacidad y madurez respecto del grado de confiabilidad de simulaciones energéticas de edificios.*

Wladimir Bugeño, Danny Lobos

**051:** *Modelación de la transferencia de calor y masa de muros vegetativos en condiciones de clima semiárido*

Mauricio García, Sergio Vera, Fabien Rouault, Waldo Bustamante

**088:** *Simulaciones de puentes térmicos basados en soluciones constructivas de acondicionamiento térmico propuestos por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile.*

Aner Martínez, Michelle Vera

**090:** *Modelo EES para el análisis de viabilidad de uso de TABS en edificios de oficinas de Chile.*

Miguel Ángel Gálvez, Rodrigo Barraza, Nina Hormazábal, Álvaro Curinao



# La influencia del usuario en el comportamiento térmico de una vivienda con ventilación natural nocturna

Occupant influence on the thermal performance of a dwelling by using night natural ventilation

**Autor 01:** Soledad Andreoni Trentacoste

Filiación: Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, CONICET, CCT Mendoza, Argentina.

Dirección: Av. Ruiz Leal s/n, CP 5500, Mendoza, Argentina.

Correo: sandreoni@mendoza-conicet.gob.ar

**Autor 02:** Carolina Ganem

Filiación: Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, CONICET, CCT Mendoza, Argentina.

Dirección: Av. Ruiz Leal s/n, CP 5500, Mendoza, Argentina.

Correo: cganem@mendoza-conicet.gob.ar

**Manuscript Code: 002**

**Date of Acceptance/Reception:**

## Resumen

Existe una brecha entre el desempeño térmico previsto mediante simulaciones y el comportamiento real de los edificios una vez en uso. Dichas diferencias se incrementan si el diseño integra estrategias pasivas que requieran un usuario activo. El presente estudio propone una aproximación a la cuantificación de la influencia del usuario en el comportamiento térmico en viviendas. Para ello se determinaron cinco perfiles de usuario: uno pasivo, tres intermedios y uno activo. Se trabajó con un caso de estudio en verano: una vivienda urbana en la ciudad de Mendoza, Argentina (32° 40' LS; 68° 51' LO y 750 msnm). Se eligió la estrategia de ventilación natural nocturna por requerir de un usuario activo para su buen rendimiento y ser apropiada para climas templados continentales. Se efectuó un monitoreo higrotérmico durante el mes de enero de 2017, en el que se realizó la gestión de la envolvente por los usuarios activo y pasivo. Se llevó a cabo un registro pormenorizado de las acciones de cada tipo de usuario. Los datos obtenidos permitieron ajustar el modelo de simulación elaborado por medio del software Energy plus, y definir 3 perfiles de usuario intermedios simulados en el mismo periodo. Se obtuvieron mediante análisis estadístico los porcentajes de temperaturas dentro del rango de confort para cada perfil de usuario. Los resultados demuestran que un correcto aprovechamiento de la ventilación natural nocturna en verano (usuario activo) mejora notablemente las condiciones de confort interior. Resultando el 82% de las temperaturas dentro del rango de confort sin la utilización de energía auxiliar para refrigeración. Los tres perfiles de usuarios intermedios mostraron temperaturas de confort en un 73%, 55% y 63% respectivamente. En el mismo periodo los datos de monitoreo del usuario pasivo muestran un sobrecalentamiento del aire interior, obteniendo solo un 43% de las temperaturas dentro del rango de confort térmico.

**Palabras claves:** Confort térmico; Uso y gestión; Ventilación natural.

## Abstract

There is a gap between expected thermal performance simulation and real building behavior once they are in use. This gap increases if the design integrates passive strategies that require an active user. This work proposes an approximation to the quantification of occupants influence on the thermal performance of dwellings. Five user profiles were determined: one passive, three intermediate and one active. As a case study, an urban dwelling in the city of Mendoza, Argentina (32° 40' S; 68° 51' W y 750 masl), was on site monitoring in summer. Nocturnal natural ventilation strategy was chosen because it required an active user for its good performance and to be appropriate for continental temperate climates. In situ measurements were taken as well as an accurate record of each user action during the management of the envelope by users passive and active, in January 2017. The data obtained allowed the adjustment of a computer simulation performed using Energy Plus and to define 3 simulated intermediate user profiles in the same period. Percentages of temperatures within the comfort range for each user profile were obtained by statistical analysis. The results show that a proper use of natural nocturnal ventilation in summer (active user) significantly improves indoor comfort conditions. Resulting 82% of the temperatures within the comfort range without the use of auxiliary energy for cooling. The three profiles of intermediate users showed comfort temperatures by 73%, 55%, and 63% respectively. In the same period, the monitoring data of the passive user shows an overheating of the indoor air, obtaining only 43% of the temperatures within the thermal comfort range.

**Keywords:** Thermal comfort; Use and management; Natural ventilation.

## Introducción

La respuesta de los usuarios de edificios a los cambios en el clima exterior con la intención de mejorar su confort interior, -ya sea modificando elementos móviles de la envolvente o utilizando equipos de acondicionamiento térmico- produce grandes variaciones en el comportamiento térmico y energético edilicio. La Agencia Internacional de Energía (IEA), en el anexo 66: "Definición y simulación del comportamiento del usuario en edificios" (IEA, 2017) de su programa de energía en edificios y comunidades (EBC), considera el comportamiento del usuario como un factor clave de impacto significativo sobre el uso real de la energía y la calidad del ambiente interior en los edificios. Sin embargo, considera que la acción del usuario esta poco reconocida y sobre simplificada en el diseño, construcción, desempeño y rehabilitación de edificios. Por lo tanto, comprender en profundidad el comportamiento del usuario y lograr

cuantificar sus impactos en el desempeño térmico y energético edilicio es crucial para diseñar, evaluar y construir edificios de bajo consumo energético.

Las auditorias edilicias y la relación de éstas con la materialización constructiva, son un importante aporte al conocimiento de los consumos reales y los comportamientos térmicos. Asimismo, las posibilidades actuales que brindan los programas de simulación resultan una herramienta apropiada para evaluar distintas alternativas (Balter, Ganem, & Discoli, 2012). Sin embargo, durante los últimos años diferentes estudios (Yan et al., 2015; IEA, 2015; Göçer, Hua, & Göçer, 2015; Nicol, 2016) demuestran que existe una brecha entre el desempeño previsto mediante simulaciones y el comportamiento real de los edificios una vez en uso. Dichas diferencias se incrementan si el diseño integra estrategias pasivas que requieran un usuario activo.

El presente estudio propone una aproximación a la cuantificación de la influencia del usuario en el comportamiento térmico en viviendas en la ciudad de Mendoza, Argentina. Partiendo del análisis de una vivienda de diseño y tecnología convencional para la zona de estudio, en condiciones reales de uso en verano, que permita generar un modelo térmico del edificio mediante el ajuste en el software Energy Plus, para la simulación del comportamiento térmico de la misma bajo la influencia de diferentes perfiles de usuarios.

## Estado del arte del problema

Las conductas del usuario en relación al uso y gestión de la vivienda son de naturaleza estocásticas, lo que significa que no solo puede variar entre un usuario y otro sino también que se modifican en el tiempo. Estudios previos afirman que las acciones de un usuario pueden responder a factores como: su percepción térmica del ambiente interior, la necesidad de mejorar la calidad del aire, el clima en el exterior, ruidos, radiación solar alta y también factores psicológicos y socio-culturales (Yan et al., 2015).

El clima local influye en las condiciones del ambiente térmico interior, siendo de gran importancia que las características morfológicas y tecnológicas de la envolvente edilicia permitan la protección y el control de dicha influencia. Diversos autores (Olgay, 1962; Coch Roura & Serra Florensa, 1991; Givoni, 1992) recomiendan para el logro del confort térmico interior en climas templados continentales, estrategias pasivas que consideren la interacción del usuario con los elementos de la envolvente edilicia. En edificios naturalmente ventilados, la principal estrategia de refrigeración en verano es la apertura de ventanas y persianas cuando la temperatura exterior desciende en relación a la interior (Raja, Nicol, & McCartney, 1998). Sin embargo, esto resulta un factor de incertidumbre para predecir el desempeño térmico edilicio. Esto se debe a que una debilidad de las simulaciones tanto dinámicas como estacionarias, desde la perspectiva del modelo de confort adaptativo, es que estas simplifican o eliminan las partes del modelo que se encargan de la interacción entre el ocupante y el edificio. Es el caso, por ejemplo, del índice PMV (voto medio predictivo) incluido dentro de la norma ISO 7730, en un estudio realizado por Humphreys y Nicol (2002), se demuestra la falta de precisión del PMV en condiciones reales de uso diario, concluyendo que el mismo puede ser seriamente confuso cuando se utilice para predecir el voto medio de confort de grupos de personas en condiciones reales de uso en edificios, particularmente en ambientes cálidos.

Estudios previos confirman que el uso de ventilación natural transversal dirigida por viento disminuye el riesgo de sobrecalentamiento en verano, principalmente en climas con variabilidad diaria y estacional (Raja et al., 1998; Palme, Carrasco, & Galvez, 2016). Siempre que el diseño de la vivienda contemple conceptos de arquitectura bioclimática y características físicas de la envolvente que permitan la gestión consiente del usuario para el logro del confort (Ganem, Esteves, & Coch, 2005). Asimismo, diversos estudios demuestran la importancia del comportamiento de los ocupantes respecto del manejo del ambiente interior de una vivienda y su incidencia en el consumo energético (Flores Larsen, Filippín, & Lesino, 2010; Sulaiman, Blasco, & Flippin, 2009). Sin embargo, en los estudios referenciados los propios autores cuestionan la generalización y extrapolación de los resultados a otras viviendas en la misma localización o en otras zonas climáticas.

## Metodología

### Caso de estudio

La ciudad de Mendoza, capital de la provincia homónima, se ubica en el centro oeste de Argentina (32° 40' latitud sur y 68° 51' longitud oeste) y a 750 msnm. La misma pertenece a la zona bioambiental IVa, templado frío, según norma IRAM 11603 (figura 1). Este clima se caracteriza por fuertes amplitudes térmicas anuales. En verano, las temperaturas oscilan entre los 34°C y 18°C, registrándose en el mes de enero la temperatura extrema diaria máxima más alta de 40,2°C (periodo 1961 a 2017). La recomendación para este clima en verano, como se observa en la carta psicrométrica (figura 2), es principalmente el aprovechamiento de la ventilación natural nocturna. Favoreciendo, en el caso de edificios con materiales de envolvente de alta inercia térmica, enfriar mediante convección la masa térmica durante la noche permitiéndole absorber el calor que pueda ingresar dentro del edificio durante el día, con solo un leve aumento de la temperatura interior (Givoni, 1992).

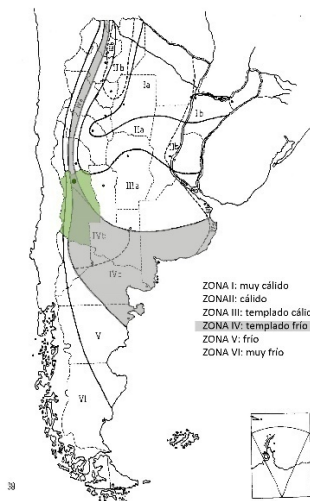


Figura1. Zonas bioambientales, Argentina. Fuente: Adaptación de las autoras en base a Norma IRAM 11603.

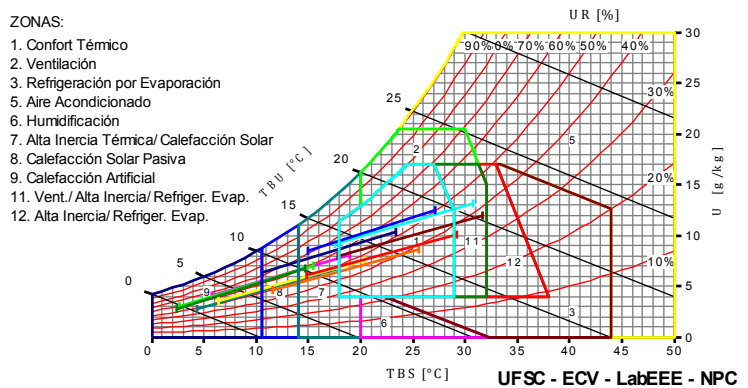


Figura2. Carta Psicrométrica para Mendoza. Fuente: Elaboración de las autoras con software AnalysisBio.

La ciudad de Mendoza es el núcleo de mayor densidad poblacional de la provincia albergando al 64% de la población y concentrando gran cantidad de edificios con predominio de residenciales de baja altura. Es por esto que en el presente trabajo se seleccionó como caso de estudio una vivienda unifamiliar ubicada en el centro urbano de la ciudad, construida entre medianeras, considerada como la tipología más representativa. La tipología constructiva de la misma es del tipo tradicional para la zona, las características de la misma se pueden observar en la siguiente tabla (tabla1):

Tabla1. Características constructivas de la vivienda. Fuente: Elaboración de las autoras.

| MATERIALES VIVIENDA |                    |                         |              |
|---------------------|--------------------|-------------------------|--------------|
| ELEMENTO            | MATERIALES         | U (W/m <sup>2</sup> °C) | ESPESOR (cm) |
| MURO                | revoque ext        | 1.16                    | 0.05         |
|                     | ladrillon          | 0.81                    | 0.18         |
|                     | revoque int        | 1.16                    | 0.03         |
| VENTANAS            | chapa plegada      | 17                      | 0.00071      |
|                     | vidrio 4mm         | 0.9                     | 0.004        |
| TECHO               | teja cerámica      | 0.76                    | 0.06         |
|                     | telgopor 5cm       | 0.03                    | 0.05         |
|                     | madera             | 0.34                    | 0.05         |
| ENTREPISO           | baldosa cerámica   | 0.7                     | 0.03         |
|                     | contrapiso         | 1.63                    | 0.15         |
|                     | losa H°A°          | 1.74                    | 0.20         |
|                     | yeso aplicado      | 0.48                    | 0.025        |
| PISO                | losa H°A°          | 1.74                    | 0.20         |
|                     | contrapiso         | 1.63                    | 0.15         |
|                     | baldosa cerámica   | 0.7                     | 0.03         |
| PISO PATIO          | contrapiso         | 1.63                    | 0.15         |
|                     | baldosa cementicia | 1.15                    | 0.15         |

### Auditoria higrotérmica, simulación y perfiles de uso y gestión

Se realizó un monitoreo higrotérmico en verano, durante el mes de enero de 2017, mediante la colocación de 4 micro adquirentes de datos HOBO U12, 3 en el interior de la vivienda y 1 en el exterior. Se examinó el desempeño térmico de la vivienda caso de estudio al aplicar la estrategia de ventilación natural nocturna por requerir de un usuario activo para su buen rendimiento y ser apropiada para climas templados continentales, sin la incorporación de acondicionamiento artificial. En este trabajo se presentan los datos recabados del estar – comedor (zona 1). Se definieron dos perfiles de usuario: activo y pasivo. El primero realizó una gestión de la envolvente consiente del aprovechamiento de la estrategia de ventilación natural nocturna preocupándose por ventilar la vivienda cuando percibía la disminución de las temperaturas en el exterior con respecto al interior, y cerrar las aberturas cuando las mismas aumentaban. Por otro lado, el usuario pasivo presentó un menor compromiso en la gestión de la envolvente, manteniendo ventanas y/o puertas abiertas durante todo el día. Se elaboró un registro de fechas y horarios detallado de las acciones de uso de la vivienda y gestión de la envolvente para cada perfil de usuario. Se simuló un modelo de la vivienda auditada (figura 6) mediante el software Energy Plus contemplando 6 zonas de estudio (figura 7), analizando para el presente trabajo los resultados obtenidos en la zona 1: estar comedor. Se seleccionó un periodo de 4 días



representativos de las temperaturas de verano en el mes de enero, incorporando días de fin de semana para monitorear mayor presencia de los usuarios y comportamientos variables de los mismos.

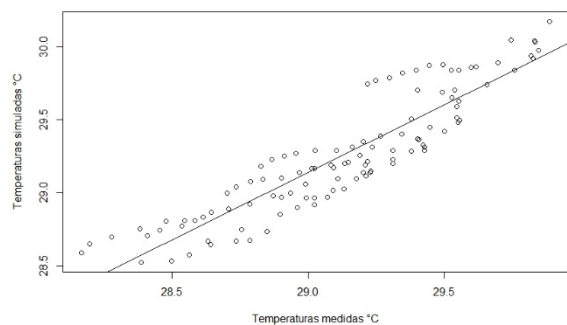


Figura 3. Correlación entre temperaturas medidas y simuladas. Fuente: Elaboración de autoras en R Studio, 2018.

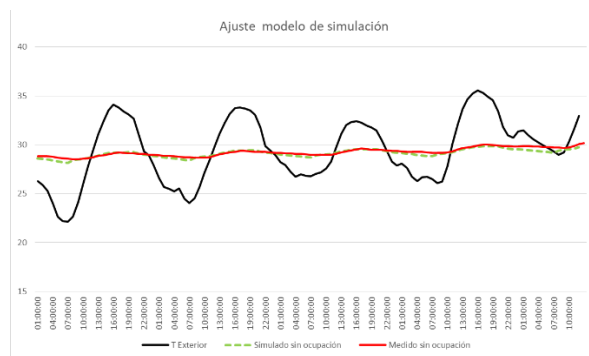


Figura 4. Curva de ajuste de temperaturas medidas y simuladas. Fuente: Elaboración de autoras, 2018.

Se realizó el ajuste del modelo simulado con los datos monitoreados de un periodo sin ocupación, obteniendo un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0,83$  (figura 3). Este valor se encuentra muy cercano a 1 lo que demuestra que el modelo ajusta correctamente y es preciso para predecir el comportamiento de las temperaturas. La figura 4 muestra el ajuste obtenido para el ambiente en estudio, las temperaturas horarias medias medidas y simuladas ajustan en un promedio de  $0,5^{\circ}\text{C}$ , considerándolo suficiente para la obtención de un modelo validado.

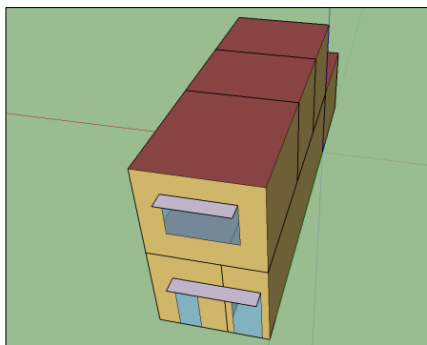


Figura5. Modelo 3D simulado. Fuente: Elaboración de las autoras mediante software Legacy Open Studio, 2018.

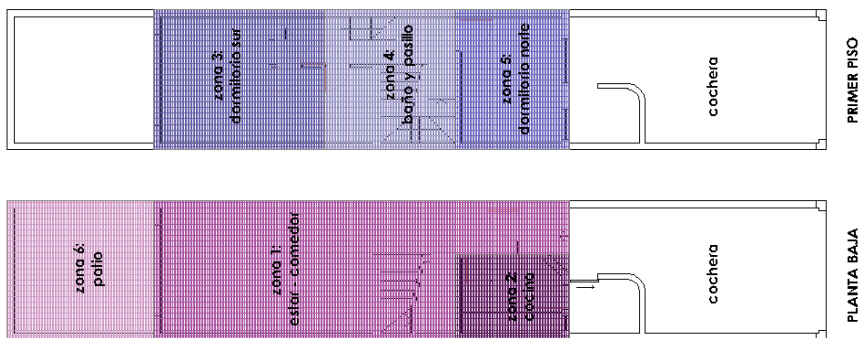


Figura 6. Plantas y zonificación simulada de la vivienda. Fuente: Adaptación de las autoras (Andreoni Trentacoste., 2014)

Una vez realizado el modelo y validado mediante el ajuste de correlación con los datos auditados se incorporaron mejoras en la calidad de los materiales de la envolvente de acuerdo a las recomendaciones para el clima de la ciudad de Mendoza, adicionando a lo descrito en la tabla 1, aislación en muros mediante la incorporación de 5cm de poliestireno expandido de alta densidad ( $U= 0.03 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ), y doble vidriado en las carpinterías, con el objetivo de disminuir la influencia de otras variables en la simulación sobre el desempeño térmico de la vivienda. También se incorporaron elementos de sombreado en las ventanas de la fachada norte.

En el presente análisis se optó por trabajar con 5 perfiles de uso representativos de las características socio-culturales de la población en Mendoza, de esta forma será posible una aproximación a la cuantificación de la influencia del usuario en el comportamiento térmico en viviendas. A los dos perfiles de usuario medidos -activo (UA) y pasivo (UP)- se le adicionaron, 3 nuevos perfiles de usuario. Luego se simularon los 5 perfiles de usuarios en el modelo validado, para un mismo periodo.

- El usuario medio 01 (UM01): se ausenta de la vivienda temprano por la mañana en días laborales dejando todo cerrado y al regresar abre ventanas y/o puertas al anochecer, esto último lo realiza aun los fines de semana.
- El usuario medio 02 (UM02): no tiene horarios fijos en la mañana, por lo que permanece en la vivienda, manteniéndola ventilada hasta horas pasadas el medio día, dejando todo cerrado al ausentarse, y volviendo a abrir ventanas y/o puertas al anochecer.
- El usuario medio 03 (UM03): tiene horario laboral de jornada completa, por lo que al salir temprano en la mañana cierra todas las aberturas, pero al llegar alrededor de las 18hs abre ventanas y/o puertas.

Las puertas interiores se mantuvieron abiertas de forma permanente en los 5 perfiles de usuario. El registro de ocupación y gestión de la envolvente de los cinco perfiles de usuario definidos: uno pasivo, tres intermedios y uno activo, se detalla en las siguientes tablas (tabla 1 y 2):

Tabla2. Registro de ocupación de los 5 perfiles de usuarios. Fuente: Elaboración de las autoras.

| FECHA     | OCUPACION                 |            |                |             |             |
|-----------|---------------------------|------------|----------------|-------------|-------------|
|           | UA                        | UM01       | UM02           | UM03        | UP          |
| 27/1/2017 | 00-8:30/13:30-14:30/21-00 | 00-7/17-00 | 00-13:30/21-00 | 00-7/18-00  | 00-8/13:30  |
| 28/1/2017 | 00-00                     | 00-9/13-21 | 00-10          | 00-7/18-00  | 00-20       |
| 29/1/2017 | 00-10/21:30-22:30         | 00-00      | 21-00          | 00-11/20-00 | 05-13/18-00 |
| 30/1/2017 | 00-8:30/13:30-00          | 00-7/17-00 | 00-13:30/21-00 | 00-7/18-00  | 00-00       |

Tabla3. Registro de gestión de la envolvente por los 5 perfiles de usuarios. Fuente: Elaboración de las autoras.

| FECHA     | GESTIÓN ABERTURAS |          |        |          |        |          |        |          |        |          |
|-----------|-------------------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|
|           | UA                |          | UM01   |          | UM02   |          | UM03   |          | UP     |          |
|           | CIERRE            | APERTURA | CIERRE | APERTURA | CIERRE | APERTURA | CIERRE | APERTURA | CIERRE | APERTURA |
| 27/1/2017 | 8:30              | 22:00    | 7:00   | 21:00    | 13:30  | 21:00    | 7:00   | 18:00    | 0:00   | 0:00     |
| 28/1/2017 | 9:00              | 23:00    | 9:00   | 21:00    | 10:00  | -        | 7:00   | 18:00    | 0:00   | 0:00     |
| 29/1/2017 | 9:00              | 0:00     | 9:00   | 21:00    | -      | 21:00    | 11:00  | 20:00    | 0:00   | 0:00     |
| 30/1/2017 | 8:30              | 23:00    | 7:00   | 21:00    | 13:30  | 21:00    | 7:00   | 18:00    | 0:00   | 0:00     |

## Resultados

Los resultados obtenidos permiten una aproximación a la cuantificación del efecto del comportamiento de distintos usuarios sobre el desempeño térmico del ambiente interior. En el gráfico de la figura 5, se puede observar la relación del desempeño térmico de la vivienda bajo la influencia del uso y gestión de los 5 perfiles de usuario analizados, y la relación de estos con la temperatura exterior para el periodo en estudio, en línea de trazo (verde) se representa la temperatura máxima admisible de confort, 28°C.

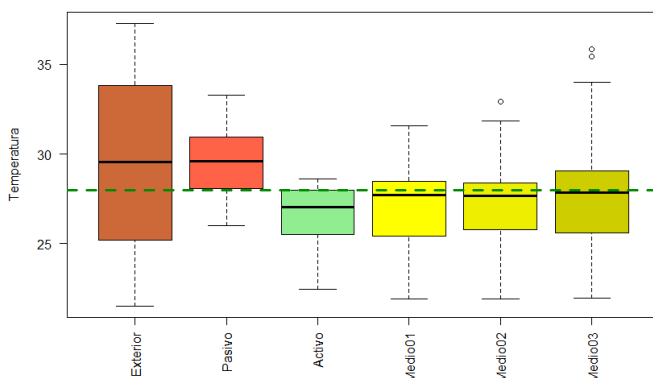


Figura5. Desempeño térmico interior en relación a la temperatura exterior para los 5 perfiles de usuario. Fuente: Elaboración de las autoras mediante software R studio, 2018.

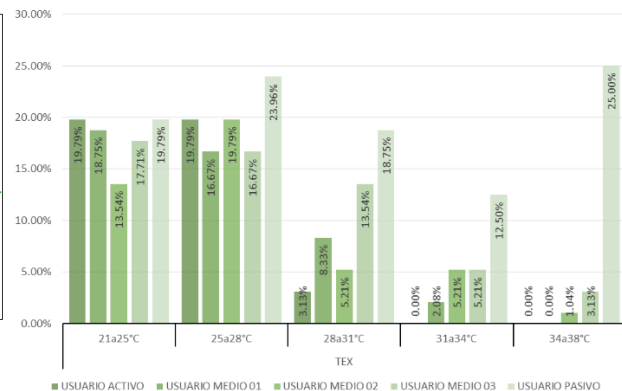


Figura6. Porcentajes de gestión de aberturas para la ventilación natural por cada usuario para cada intervalo de temperaturas exteriores. Fuente: Elaboración de las autoras, 2018.

En el gráfico de la figura 5 se puede observar la gestión del usuario pasivo (UP), el cual mantuvo abiertas las ventanas y/o puertas en forma permanente, provocando condiciones interiores fuera del rango de confort. En más del 75% de los datos de temperatura analizados, las temperaturas del estar-comedor se encuentran por encima de la máxima de confort de 28°C, con una máxima absoluta registrada en 33,3°C. Se puede observar en el gráfico de la figura 6, el registro de un 59,3% del tiempo de apertura de ventanas cuando la temperatura exterior se encontraba por encima de los 28°C, con un 25% de ese tiempo entre los 34 a 38°C de temperatura exterior, favoreciendo la ventilación natural en los momentos menos propicios, permitiendo el ingreso de aire caliente en la vivienda, imposibilitando el refrescamiento de la masa térmica en el interior.

Por otro lado, el usuario activo, logró un mejor desempeño térmico del espacio interior, con el 75% de las temperaturas registradas dentro de los parámetros de confort, encontrándose el 50% de estas entre los 25,5°C (cuartil

1) y los 28°C (cuartil 3) con una media de 26,6°C, se observa marcada asimetría con mayor dispersión de las temperaturas inferiores registrando una mínima de 22,5°C. Es notable destacar que si bien el usuario activo registró el 25% de los datos por encima de la máxima de confort, estos estuvieron concentrados entre los 28°C y los 28,6°C, es decir que la variación fue de medio grado en el 25% de los datos de máximas interiores para este usuario, lo que indica una menor amplitud térmica ( $\Delta T=6^\circ\text{C}$ ). En el gráfico de gestión de aberturas (figura 6), se observa la acción comprometida de este perfil de usuario, ventilando en un 39,6% del tiempo durante los periodos de temperatura exterior por debajo de los 28°C y tan solo un 3,1% del tiempo en el intervalo de temperatura exterior entre 28°C y 31°C, conservando el resto del tiempo las ventanas y puertas cerradas.

En cuanto a los usuarios intermedios, si bien los tres lograron registros de temperatura mínima interior idénticos, alrededor de los 21,9°C y la dispersión del 25% de los datos de temperaturas inferiores es similar en los tres casos, el gráfico se comporta diferente por sobre la temperatura máxima admisible de confort establecida en 28°C. El usuario medio 03, registró mayor dispersión de los datos hacia las temperaturas superiores, con el 25% de estos entre los 29,06°C y los 35,8°C siendo esta última la máxima, aunque se observan también datos extremos por encima de la misma. Los usuarios medios 01 y 02 lograron un desempeño similar de las temperaturas interiores, aunque el segundo registró temperaturas máximas superiores.

Al observar en detalle un día típico dentro del periodo analizado (figura 7), se obtuvieron mediante análisis estadístico los porcentajes de temperaturas dentro del rango de confort para cada perfil de usuario (figura 8).

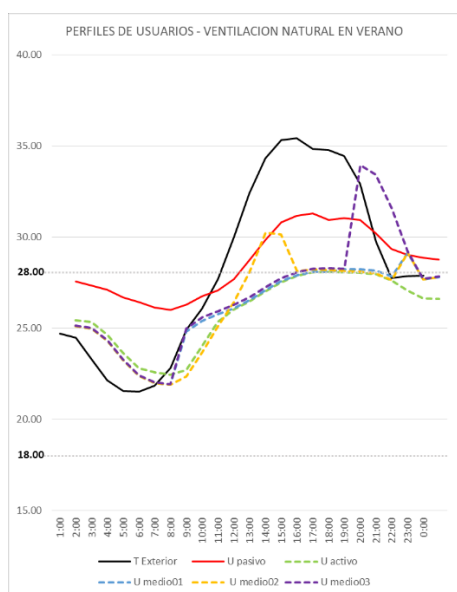


Figura7. Comportamiento térmico para 5 perfiles de usuario, día 27/01/2017 (verano). Fuente: Elaboración de las autoras, 2018.

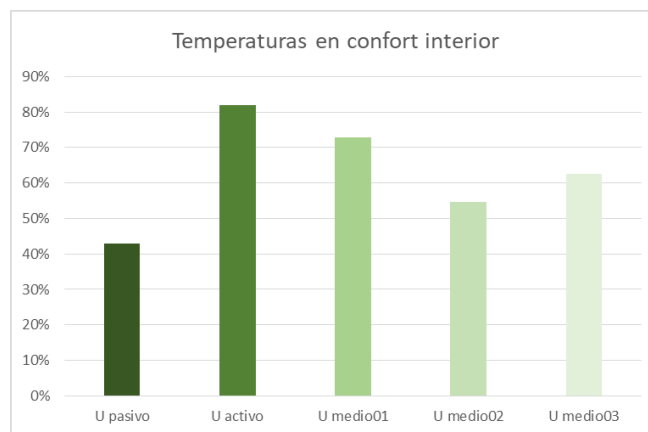


Figura8. Porcentajes de temperaturas en confort conseguidos por 5 perfiles de usuario, día 27/01/2017 (verano). Fuente: Elaboración de las autoras, 2018.

Los resultados demuestran que un correcto aprovechamiento de la ventilación natural nocturna en verano, logrado por el perfil de usuario activo (UA - línea de trazo verde) mejora notablemente las condiciones de confort interior, logrando temperaturas entre 22°C y 28°C, manteniéndose dentro del rango de confort en un 82%, conservando una amplitud térmica diaria interior aceptable ( $\Delta T=6^\circ\text{C}$ ), estando las temperaturas exteriores entre 21°C y 35°C. Los perfiles de usuarios intermedios (UM01, UM02 y UM03 – color azul, amarillo y violeta) mostraron temperaturas de confort en un 73%, 55% y 63% respectivamente. Por otro lado, los datos del usuario pasivo (UP -línea roja) muestran un sobrecalentamiento del aire interior, obteniendo temperaturas entre los 27°C y 33°C, por encima del rango de confort térmico, estando las temperaturas exteriores entre 21°C y 37°C. Aun en horas de la noche, se puede observar una diferencia de al menos 5°C por sobre la temperatura exterior, lo que demuestra el poco aprovechamiento de la estrategia analizada en el caso del usuario pasivo, en comparación a los demás perfiles de usuario, y la dificultad de refrigeración natural de la vivienda cuando la masa se ha cargado por demás durante el día al ingresar el aire caliente del exterior.

Es interesante observar los picos de temperatura registrados en los perfiles de usuario medios 02 (línea trazo amarillo) y 03 (línea trazo violeta), al cerrar tarde o abrir temprano las aberturas respectivamente. Sin embargo, cabe destacar que la gestión realizada por el UM03 impactó un 8% menos que la del UM02, demostrando que es preferible ventilar antes de lo recomendado, cuando las temperaturas exteriores aún no han descendido lo suficiente, a cerrar las ventanas tarde en la mañana, una vez que las temperaturas exteriores han comenzado a aumentar, aunque ninguna de estas es la gestión más conveniente.

## Discusión y Conclusiones

El presente trabajo realiza un análisis comparativo del comportamiento de 5 perfiles de usuarios representativos del uso y gestión de viviendas en la ciudad de Mendoza, Argentina.

Los resultados del presente estudio, demuestran que el comportamiento del usuario es un aspecto relevante en la valoración del desempeño térmico edilicio. Por esto, resulta necesario parametrizar y evaluar su influencia a partir del análisis de una vivienda en condiciones reales de uso. La metodología actualmente aplicada para el análisis térmico edilicio mediante simulación computacional, considera el perfil de uso estimado basado en parámetros fijos representativos de la gestión más conveniente de acuerdo a las recomendaciones para cada región y clima. Para viviendas en la ciudad de Mendoza, el perfil UA definido en este trabajo es el que responde al uso y gestión recomendados para verano. Al momento de realizar un análisis de simulación térmica edilicia contemplando las características de uso y gestión del perfil UA, podemos calcular un porcentaje de confort estimado para la vivienda en estudio del 82%. Sin embargo el desempeño térmico de una misma vivienda puede variar significativamente por influencia del uso y gestión de quien la habite oportunamente. En el caso del UM01 la diferencia en el logro del confort real es del 9% por debajo del confort estimado, para el UM02 es del 27% y para el UM03 del 19%, siendo el caso más desfavorable el UP con una diferencia del 39%. Siendo estos valores representativos del riesgo que implica la diferencia en los valores ingresados en el modelo de simulación en cuanto al comportamiento del usuario. Se concluye, que la diferencia entre el confort estimado mediante simulaciones y el accionar real de los usuarios -en promedio- está en el orden del 24% para los casos estudiados. Este valor, a considerar en la evaluación de proyectos, presenta una primera aproximación a la cuantificación de la influencia del usuario en el comportamiento térmico en viviendas en la ciudad de Mendoza, Argentina.

## Agradecimientos

Las autoras agradecen a los propietarios de la vivienda auditada por su buena predisposición a adoptar los distintos tipos de manejo de la envolvente auditados. Asimismo, los presentes resultados pertenecen a los avances del Plan de Beca Doctoral de la Mgtr. Soledad Andreoni Trentacoste, financiados por el CONICET.

## Referencias

- Andreoni Trentacoste, S. E. (2014). Protocolo de diagnóstico térmico-energético para la rehabilitación de viviendas en la Ciudad de Mendoza, Argentina. Tesis de Maestría. Universidad Internacional de Andalucía.
- Balter, J., Ganem, C., & Discoli, C. (2012). Auditoría y simulación termo-energética como instrumentos de validación para el estudio y mejoramiento de edificios en altura en "Ciudades Oasis". Ejemplo de aplicación sobre una unidad de vivienda en la ciudad de Mendoza. *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente*, 16, 05.59-05.66. Retrieved from <http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2012/2012-t005-a001.pdf>
- Coch Roura, H., & Serra Florensa, R. (1991). *Arquitectura y energía natural*. (UPC, Ed.). Barcelona, España.: UPC.
- Flores Larsen, S., Filippín, C., & Lesino, G. (2010). La incidencia de los usuarios en el comportamiento termico de verano de una vivienda en el noroeste argentino. In IV Conferencia Latino Am ericana de Energía Solar (IV ISES\_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII- SPES) (pp. 1-5). Cusco.
- Ganem, C., Esteves, A., & Coch, H. (2005). El rol de la envolvente en la rehabilitación ambiental. Propuestas de Verano para viviendas tipo Chalet en Mendoza. *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente*, 9, 49-54.
- Givoni, B. (1992). Comfort , climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18, 11-23.
- Göçer, Ö., Hua, Y., & Göçer, K. (2015). Completing the missing link in building design process: Enhancing post-occupancy evaluation method for effective feedback for building performance. *Building and Environment*, 89, 14-27. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.011>
- Humphreys, M. A., & Fergus Nicol, J. (2002). The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings*, 34(6), 667-684. [http://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00018-X](http://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00018-X)
- IEA. (2015). IEA-EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings. Retrieved from [www.annex66.org](http://www.annex66.org)
- IEA. (2017). Annex 66 newsletter No.5 - final. International Energy Agen.
- Nicol, J. F. (2016). Adaptive thermal comfort in domestic buildings. In *Making Comfort Relevant: 9th Windsor 2016*. Cumberland Lodge, Windsor, UK.
- Olgay, V. (1962). *Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Palme, M., Carrasco, C., & Galvez, M. Á. (2016). Estimación del riesgo de sobrecalentamiento y del potencial de refrigeración por ventilación natural de viviendas unifamiliares en ciudades costeras de Chile. *Habitat Sustentable*, 6, 52-61.
- Raja, I. A., Nicol, J., & McCartney, K. (1998). Natural ventilated buildings: Use of controls for changing indoor climate. *Renewable Energy*, 15(1), 391-394. [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00193-1](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00193-1)



- Sulaiman, H., Blasco, I., & Flippin, C. (2009). Incidencia del usuario en el comportamiento higrotermico estival de una vivienda convencional en san juan. *Asades*, 13(Tipo II), 53–60.
- Yan, D., O'Brien, W., Hong, T., Feng, X., Burak Gunay, H., Tahmasebi, F., & Mahdavi, A. (2015). Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges. *Energy and Buildings*, 107, 264–278. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.032>

## Predicción del comportamiento térmico y energético de un proyecto de bodega. Resiliencia y adaptación al cambio climático.

Prediction of the thermal and energetic behavior of a winery project. Resilience and adaptation to climate change.

**Autor 01:** Carolina Ganem

Filiación: Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, CONICET, CCT Mendoza, Argentina.

Dirección: Av. Ruiz Leal s/n, CP 5500, Mendoza, Argentina.

Correo: [cganem@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:cganem@mendoza-conicet.gob.ar)

**Autor 02:** Gustavo Barea

Filiación: Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, CONICET, CCT Mendoza, Argentina.

Dirección: Av. Ruiz Leal s/n, CP 5500, Mendoza, Argentina.

Correo:

**Manuscript Code:** 003

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

### Resumen

El presente trabajo se enmarca en el proyecto de I&D financiado por la SECTYP-UNCUYO: USO RACIONAL DE LA ENERGÍA Y SUSTENTABILIDAD EN LA INDUSTRIA VITIVINÍCOLA y presenta el análisis térmico y energético de un proyecto de bodega en el Valle de Uco, Provincia de Mendoza (33° 34' 57,4" LS; 69° 02' 47,8" LO y 1.025 msnm) en la situación actual y en 3 escenarios tentativos (2020-2050-2080). Si bien se trata de un valle frío intermontano (GD base 18 = 1963 / GD base 20 = 2466) se asume que las condiciones climáticas serán más calurosas en el año 2080 debido al cambio climático. Para llevar adelante el trabajo se realizó un modelo en Energy Plus de la propuesta arquitectónica con las condiciones climáticas actuales, y a futuro de acuerdo con el escenario A2 del IPCC. Las condiciones meteorológicas se adoptaron mediante uno de los GCM (modelo matemático predictivo) del IPCC. Mediante Climate Change World Weather File Generator (CCWorldWeatherGen), desarrollado por Sustainable Energy Research Group (Universidad de Southampton), se generan los archivos EPW. De acuerdo con el proyecto inicial, el consumo actual se estimó en 35,70 kWh/m<sup>2</sup> (135.374,40 kWh año), y al efectuarse las mejoras propuestas en la envolvente el consumo se redujo a la mitad, a 18,28 kWh/m<sup>2</sup> (69.317,76 kWh año). Con estos resultados se evalúan los consumos futuros en los tres escenarios mencionados. El edificio con mejoras resulta ser resiliente y se adapta al cambio climático manteniendo los consumos energéticos de refrigeración a lo largo de su vida útil, a diferencia del proyecto inicial en el que los consumos energéticos de refrigeración llegan a triplicarse para el año 2080.

**Palabras claves:** simulación térmica y energética, resiliencia, cambio climático.

### Abstract

The present work is part of the R & D project financed by the SECTYP-UNCUYO: RATIONAL USE OF ENERGY AND SUSTAINABILITY IN THE WINE INDUSTRY and presents the energy analysis of a winery project in the Uco Valley, Province of Mendoza (SL 33° 34'57,4 "LS; WL 69° 02'47,8" and 1,025 masl) in the current situation and in 3 tentative scenarios (2020-2050-2080). Although it is a cold intermontane valley (GD base 18 = 1963 / GD base 20 = 2466) it is assumed that climatic conditions will be warmer in the year 2080 due to climate change. To carry out the work, a model of the architectural proposal with the current and future climatic conditions according with IPCC scenario A2, was made in Energy Plus. The meteorological conditions were adopted from a GCM (predictive mathematical model) of the IPCC. By using the Climate Change World Weather Generator (CCWorldWeatherGen), developed by the Sustainable Energy Research Group (University of Southampton), EPW files were developed. According to the initial project, a consumption of 35,70 kWh/m<sup>2</sup>(135.374,40 kWh year) was estimated, and with the proposed envelope improvements the consumption was reduced to 18,28 kWh/m<sup>2</sup> (69.317,76 kWh year). With these results, future consumptions are evaluated in the three mentioned scenarios. The building with improvements is resilient and adapts to climate change while maintaining the same energy consumption throughout its useful life, unlike the initial project in which energy consumption triplicates by the year 2080.

**Keywords:**thermic and energetic simulation, resilience, climate change.

El medio industrial es uno de los sistemas más intensivos que ha creado la humanidad. Consume proporciones sustanciales de los recursos naturales para su construcción y funcionamiento, y también participa en una buena medida en los desechos que se depositan en la biosfera. La industria debería ser concebida como una gestión de los recursos energéticos y materiales, como parte de los flujos e intercambios continuos de energía y materiales dentro de la biosfera. Nadie podría negar que los seres humanos nos hemos convertido en una fuerza ambiental considerable en los últimos 10.000 años. Con la llegada de la agricultura hace 8.000 años, comenzamos a cambiar la faz de la tierra, y con la revolución industrial comenzamos a afectar la atmósfera. (Boyle Torrey, 2004). Los edificios consumen el 40% de la energía global, el 25% del agua global y el 40% de los recursos globales; y emiten el 33% del total de emisiones de efecto invernadero. (Unión Europea, 2010) (United Nations Energy Programme, 2011). En síntesis, los edificios no se comportan adecuadamente en términos de comportamiento térmico y consumos energéticos asociados. (Scofield, 2012). La predicción del comportamiento térmico y energético de los edificios en las etapas de proyecto posibilita el diseño de una mejor respuesta al clima del lugar previo a su construcción, evitando consumos de energía en la etapa de funcionamiento y operación de los edificios que impactarán durante muchas décadas, incluso un siglo, sobre la economía y sobre el medioambiente. Por estos motivos es clave trabajar con la orientación, la forma y la materialidad del edificio en etapas de proyecto, tomando en consideración el clima del lugar presente y futuro. De esta forma se asegurará la construcción de un edificio resiliente al cambio climático. En este trabajo se realiza el análisis a partir de un proyecto de bodega en el Valle de Uco, Provincia de Mendoza.

La Provincia de Mendoza está situada en la diagonal árida de América del Sur se caracteriza por el dominio que imprime la Cordillera de los Andes: cordillera, precordillera, valles intermontanos, bolsones y llanos conforman el paisaje local. La cota de 1.000 m.s.n.m. divide el territorio en dos mitades en sentido Norte-Sur: zonas montañosas y pedemontes al Oeste y planicies por el Este. Este desequilibrio territorial es el causante de la mayoría de los problemas ambientales, manifestados por agudos procesos de concentración de la población y de las actividades productivas en porciones escasas del territorio: los "oasis" irrigados, dejando casi deshabitado el resto del territorio. La ciudad de Mendoza presenta, entre otros severos problemas, una isla de calor que alcanza los 10°C (valores comparables con ciudades como Tokio con una densidad edilicia muy superior a Mendoza) (Correa, E. 2006) y graves problemas de contaminación del aire causados principalmente por el parque automotor (fuentes móviles) que representan el 70% de las emisiones y el 30% restante provienen de las industrias (fuentes fijas) (Puliafito, E. 2005). Estas condiciones afectan directamente al oasis productivo, que ve por un lado reducida su extensión por el crecimiento urbano de baja densidad y no-planificado; y por el otro lado comprometidas sus características ambientales esenciales para la producción vitivinícola debido a los cambios que están ocurriendo en el microclima derivados de las emisiones polucionantes provenientes de fuentes fijas y móviles. La producción de vino es la industria regional más importante ya que corresponde a una economía emergente, y, por lo tanto, su consumo de energía se multiplica cada año. Del año 2000 al 2009, la superficie cultivada con plantas de vid pasó de 201.113 hectáreas a 228.575 hectáreas. En 2000, la cantidad de uvas de alta calidad producida fue de 1.275.772 toneladas, en 2013 esta cifra se incrementó a 1.997.442 toneladas y en 2018 dicha cifra volvió a incrementarse a 2.568.726 toneladas marcando una clara tendencia en aumento. (Instituto Nacional de Vitivinicultura, 2000, 2014, 2018).

Primeros estudios realizados en establecimientos vitivinícolas en el Oasis Norte de la Provincia de Mendoza durante la época de vendimia (enero-febrero-marzo) demuestran claramente las potencialidades de la integración en la envolvente arquitectónica de estrategias de acondicionamiento pasivo. En el período estudiado, la demanda de refrigeración es mayor debido a que toneladas de materia prima (a alrededor de 26-30°C de temperatura) deben ser procesadas a 8°C, mientras que las temperaturas exteriores se encuentran alrededor de los 38°C. Con consumos en el orden de las 100.000 kWh por mes (enero, febrero y marzo) de energía auxiliar no-renovable, las temperaturas interiores se mantienen alrededor de los 18°C. En la situación edilicia actual evaluada *in situ*, lograr temperaturas interiores estables en 15°C requeriría un consumo en el orden de los 390.000 kWh. (Ganem, Barea y Balter, 2015) El Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2009) realizó un estudio de relevamiento de consumos energéticos en 20 bodegas. El mismo reporta que los consumos eléctricos de las bodegas estudiadas se encuentran en un rango entre los 28.718 y los 709.257 kWh anuales, y que como promedio consumen 275.691 kWh de energía eléctrica al año. Las considerables variaciones dependen del tamaño de la bodega y de su orientación, forma y materialidad. Es evidente la oportunidad que se presenta en la mejora de las envolventes en bodegas si consideramos que hay bodegas que consumen sólo el 10% del consumo promedio y otras que consumen el triple que el consumo promedio. Asimismo, se ha demostrado que el nivel de temperatura interior necesario para la producción del vino, en algunos casos, es factible de ser alcanzado sólo a partir de la incorporación de estrategias pasivas en la envolvente arquitectónica eliminando de esta forma el consumo energético auxiliar. Existe la posibilidad de proyectar los espacios más comprometidos térmicamente en forma subterránea y/o agregar estrategias de ventilación nocturna y lograr temperaturas interiores en el orden de 15°C, óptimas para la elaboración vitivinícola. (Ganem, Barea y Balter, 2015).

En este trabajo se presenta la predicción del comportamiento térmico y energético de un proyecto de bodega a construirse en el Valle de Uco, Oasis Centro de la Provincia de Mendoza en la situación climática actual y en 3 escenarios tentativos a futuro (2020-2050-2080). Se evalúa en primera instancia el proyecto con la materialización habitual en la zona. Luego, se trabaja con la materialización de la envolvente al proponer mejoras en su resistencia térmica. El cumplimiento de las transmitancias térmicas máximas admisibles de los elementos de cerramiento de un local puede no ser suficiente para controlar las pérdidas de calor totales del conjunto. Por este motivo se elige trabajar con el coeficiente volumétrico de pérdida de calor  $G$ , que es un parámetro global que pondera todos los elementos que intervienen en el proceso, de acuerdo con lo establecido por la Norma Argentina IRAM 11604 (2001).

En el caso de la bodega en estudio, el valor  $G$  del proyecto original es de  $G = 3,89$  y de  $G = 0.843$  para el caso del proyecto mejorado. La Norma Argentina IRAM 11604 (2001) establece un  $G$  máximo admisible para el clima del lugar de  $G=1.16$ , por lo que las propuestas de mejora se enmarcan dentro de las exigencias de la normativa citada. El objetivo es a partir de la predicción del comportamiento térmico y energético, valorar la resiliencia y las posibilidades de adaptación al cambio climático en cada caso.

### Estado del arte del problema

En la actualidad, el mayor foco en la eficiencia energética, los códigos más estrictos y la sostenibilidad han impulsado la demanda de la industria de la construcción a realizar un análisis energético integral en los proyectos. (American Institute of Architects, 2012) En algunos casos se trata de predecir el comportamiento térmico y energético para efectuar modificaciones en el proyecto, previas a su construcción, que posibiliten una mejora en el comportamiento del mismo. En otros casos, la búsqueda de la predicción térmica y energética responde también al logro de un estándar o certificación que acredite dicho comportamiento.

La Directiva Europea 2010/31/CE, determina para el cálculo de la eficiencia energética de los edificios, qué aspectos deben considerar los procedimientos, dentro de su alcance y en relación al comportamiento energético de los edificios: capacidad térmica, aislamiento, calefacción pasiva, instalaciones de calefacción y ACS, ventilación natural y mecánica, iluminación, diseño, emplazamiento y orientación, cargas internas, energías renovables, entre otros. Asimismo, regula que al posible comprador o arrendatario de un edificio o de alguna unidad de un edificio se le debe dar, en el certificado de eficiencia energética, información correcta acerca de su eficiencia energética, así como consejos prácticos sobre cómo mejorarla. Las campañas de información pueden servir a animar más a propietarios y arrendatarios a mejorar la eficiencia energética de sus edificios o de unidades de estos. También debe animarse a propietarios y arrendatarios de edificios comerciales a intercambiar información en relación con el consumo de energía, con el fin de garantizar la disponibilidad de todos los datos para estar bien informados a la hora de tomar decisiones sobre las mejoras necesarias. El certificado de eficiencia energética debe también informar del impacto real de la calefacción y la refrigeración en las necesidades de energía del edificio, de su consumo de energía primaria y de sus emisiones de dióxido de carbono. (Unión Europea, 2010) Con el mismo objetivo, en el caso de Argentina, el Ministerio de Energía y Minería lleva adelante un programa de Etiquetado de Eficiencia Energética en el que se trabaja en el desarrollo de normativas de etiquetado y estándares mínimos que tengan impacto en el sector productivo. Las normas de etiquetado son estudiadas y desarrolladas por el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), con la participación de fabricantes, comercializadores, laboratorios de ensayo, organismos de certificación, universidades, expertos en la materia y autoridades; todos ellos involucrados en el proceso de etiquetado y certificación. En el año 2017 se iniciaron las pruebas piloto de Etiquetado de Eficiencia Energética en las principales ciudades del país, actualmente en marcha. (MINEM, 2018)

Para realizar un análisis energético integral de una edificación se utilizan programas de simulación dinámica. Al respecto Crawley, Lawrie; Pedersen y Winkelmann (2000) exponen en el ASHRAE JOURNAL que varios programas de simulación energética desarrollados a lo largo del mundo están llegando a la madurez. Muchos utilizan métodos de simulación (y hasta códigos) desarrollados originalmente en los años 60. Sin contar con un rediseño sustancial o reestructuración del programa, continuar expandiendo sus capacidades es difícil, consume mucho tiempo y es prohibitivamente costoso. Sin embargo, avances fenomenales en métodos de análisis y potencia computacional han incrementado la oportunidad para mejoras significativas en cuanto a la flexibilidad y capacidad abarcativa estas herramientas. Debido a estas circunstancias el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) comenzó en 1995 el desarrollo de una nueva generación de herramientas de simulación. El programa Energy Plus es un programa de simulación de comportamiento edilicio que combina las mejores capacidades y herramientas de BLAST y DOE-2 junto con nuevas capacidades. Se trata de un nuevo código escrito en Fortran 90. Las características incluyen: 1-cálculos de carga de balance térmico; 2-cargas, sistema y planta integrados; 3-cálculos en el mismo lapso de tiempo; 4-descripción del sistema HVAC configurable por el usuario; 5-estructura modular para que sea fácil para otros desarrolladores agregar un nuevo módulo de simulación; 6-formatos simples de datos de entrada y salida para facilitar el desarrollo gráfico. No obstante el hecho de que ya han transcurrido 18 años desde que los mencionados autores exponían las

bondades y recomendaban el uso del programa Energy Plus, la misma sigue siendo la alternativa que mejor se ajusta para la predicción de comportamiento térmico y energético de un edificio. Asimismo, además de los aspectos contemplados en las distintas normativas enunciadas, en este trabajo se propone trabajar con evaluaciones que incluyen en la predicción térmica y energética distintas situaciones climáticas a futuro para poder valorar la resiliencia que tendrá el edificio una vez construido frente a la adaptación al cambio climático. Los aspectos del diseño resiliente son importantes para reducir los impactos negativos del clima (mitigación) así como también para prepararse para eventos extremos resultantes del cambio climático (adaptación). El cambio climático debe ser referido de manera holística fusionando resiliencia y estrategias sustentables en una estrategia abarcativa de adaptación. (Achour y Price, 2010).

## Metodología

La metodología utilizada sigue las recomendaciones de la Agencia Internacional de la Energía (*International Energy Agency – IEA*) en su Anexo 21 “*Thermal Response Test*” (Clark, 2016) desarrolla el concepto de un “método de evaluación del rendimiento” (*performance assessment method - PAM*). Un PAM es una guía para evaluar el rendimiento edilicio a través de la simulación energética de un edificio, la que requiere el establecimiento de un caso base de diseño, la calibración del modelo, la evaluación de las condiciones límites, la identificación de problemas, la generación de posibles soluciones y su evaluación.

### Utilización de la simulación con el software Energy Plus versión (8.9, 2018)

- Elaboración de un archivo de datos de clima estadísticos EPW para el sitio en que se construirá el proyecto.
- Elaboración de una biblioteca de propiedades físicas de materiales.
- Generación de un Modelo físico geométrico en Open Studio
- Identificación de 22 zonas térmicas, energéticas.
- Primera corrida general de 1 año de duración: 8760 horas.
- Valoración de los resultados y recomendaciones de mejora.
- Elaboración de una nueva biblioteca de propiedades físicas de los materiales.
- Segunda corrida general de 1 año de duración: 8760 horas.
- Trabajo con modelos de climas futuros.
- Análisis de sustentabilidad y resiliencia de los resultados obtenidos. Posibilidades de la bodega de adaptación al cambio climático.

### Clima y modelos de clima futuros

Los datos meteorológicos utilizados para construir simulaciones de energía se basan generalmente en condiciones climáticas actuales o pasadas. Sin embargo, la mayoría de los edificios tienen una vida útil de varias décadas, durante la cual el clima puede cambiar gradualmente (H. Kikumoto, et al 2015). Sería conveniente que las simulaciones energéticas edilicias incorporaran predicciones para garantizar que los edificios se adapten a condiciones futuras.

Para la creación de los escenarios meteorológicos, se utilizó la herramienta Climate Change World Weather File Generator (CCWorldWeatherGen) desarrollada por Sustainable Energy Research Group, Universidad de Southampton (SERG, et al 2009). Esta herramienta permite generar directamente archivos meteorológicos horarios en formato “.epw” para EnergyPlus en función de los datos mensuales climáticos futuros pronosticados por HadCM3 para el escenario A2 del IPCC (2010).

El escenario A2, se caracteriza por simular un mundo heterogéneo con países autosuficientes independientes, crecimiento continuo de la población y un desarrollo económico orientado a la región (IPCC, 2010).

Para predecir los escenarios futuros hacia el cambio climático, se utilizó archivos climáticos TMY2 presentes, del período 1961-1990, para Tupungato, Mendoza. Luego de generar el epw para Mendoza, el soft CCWorldWeatherGen, promedia, de acuerdo a una cuadrícula de 96°x73°, los cuatro puntos más cercanos a la localidad definida en el archivo \*.epw. La grilla de cálculo para las coordenadas estudiadas caen con dos puntos sobre del lado cordillerano argentino y dos puntos sobre la costa chilena. Como para Mendoza no disponemos de grillas más detalladas se ha seleccionado el punto más cercano a las coordenadas de estudio, descartándose los otros puntos de la grilla.

En la Figura 1 se observan las temperaturas entre los escenarios TMY, 2020, 2050 y 2080. Los valores anuales muestran que el clima aumentaría sus temperaturas hacia el 2080. Los valores más comprometidos serían las temperaturas medias mínimas, ya que la diferencia entre el TMY y el escenario para el 2080, supera los 4.50 °C. Las temperaturas medias máximas y medias aumentan en promedio 3.10°C y 3.6°C respectivamente.





Figura 1. Climas simulados. De izquierda a derecha: (a) Temperaturas mínimas, (b) Temperaturas máximas y (c) Temperaturas medias.

### Caso de estudio

A fin de incorporar estrategias sustentables en las primeras fases de un proyecto, se deben conocer los requerimientos higro-térmicos y lumínicos de cada espacio a construir. En el caso de una bodega las condiciones ambientales óptimas de los distintos locales, varían de unos a otros en función de las circunstancias de trabajo para las personas y de las mejores situaciones para el almacenamiento o crianza de los vinos. Los regímenes de temperatura y humedad son los principales factores ambientales que se precisan controlar en los distintos locales de la bodega, pero además son también de tener en cuenta en algunas dependencias, los niveles de iluminación necesarios para un adecuado trabajo, y la total ausencia de olores extraños, eliminados en algunos casos por una adecuada ventilación, y en otros casos por el control de los distintos materiales de construcción o de almacenamiento dentro de la bodega. (Moreno, J., 2008).

En este trabajo se presenta un proyecto de bodega de 3792 m<sup>2</sup>, distribuidos 1867m<sup>2</sup> a nivel subsuelo (semi-enterrado) y 1925 m<sup>2</sup> a nivel sobresuelo. Las distintas etapas correspondientes a la elaboración del vino y al funcionamiento de la bodega se detallan a continuación subdivididas en 5 grupos:

#### 1. Fermentación: 870m<sup>2</sup> (sobresuelo)

- La temperatura es más importante en los recipientes que en el conjunto del edificio. Entre la doble pared de las cubas donde se realiza la fermentación, se colocan unos tubos, por donde se hace circular agua caliente o fría, dependiendo de lo que se quiera conseguir.
- Como estas cubas tienen apertura superior, el CO<sub>2</sub> que se forma de las reacciones químicas por su mayor densidad que el aire, baja y se acumula en la parte inferior. Por lo que la ventilación debe ser inferior para mover este aire viciado.- Y la luz también puede variar la fermentación, así que la necesaria para manejarse dentro de la instalación, aunque esta la fase donde más iluminación se permite y se necesita.
- Ocupación: 0.01 personas por m<sup>2</sup>.
- Termostato: Sin termostato.
- Renovaciones totales al 0.50 reno/hora en todos los espacios. Mezcla de aires entre zonas 1/hralwayson.

#### 2. Crianza: 579 m<sup>2</sup> (subsuelo)

A partir de esta fase lo importante es la estabilidad dentro de los siguientes rangos de referencia:

- Temperatura del aire entre los 12-16 °C.
- mantener la humedad relativa en los márgenes 70-82 %.
- eliminar malos olores y demás sustancias volátiles del aire que puedan filtrarse por la madera de las barricas.
- Luz mínima. En esta etapa se realizan tareas de movimiento, ya sea trasiegos, almacenaje de barricas y por lo tanto la necesidad de iluminación es variable.
- Ocupación: 0.01 personas por m<sup>2</sup>.

- Termostato: 15 – 17°C.
- Renovaciones totales al 0.50 reno/hora en todos los espacios. Mezcla de aires entre zonas 1/hralwayson.

### 3. Guarda: 644m2 (subsuelo)

De todas las etapas, en esta la estabilidad es la fundamental. Mantenerse los cuatro parámetros (temperatura, humedad, iluminación y ventilación) estables y controlados es esencial para conseguir que el vino salga bien. Ya que en esta etapa el vino está embotellado, ya no se tocará hasta que se traslade.

- Temperatura del aire entre los 12-16 °C.
- mantener la humedad relativa en los márgenes 70-82 %.
- Mantener niveles bajos de iluminación es más importante que en el resto de fases. Aquí el vino esta en botella de vidrio que deja pasar la luz, sobre todo los ultravioletas, son los que más pueden afectar la calidad final del producto.
- Ocupación: 0.01 personas por m2.
- Termostato: 15 – 17°C.
- Renovaciones totales al 0.50 reno/hora en todos los espacios. Mezcla de aires entre zonas 1/hr always on.

### 4. Oficinas, Turismo y espacios de permanencia de personas: 719 m2 (sobresuelo)

Estos espacios se encuentran sobresuelo y están preparados para recibir al visitante o turista. Buscan las mejores vistas y la envolvente conciente una mayor cantidad de superficies vidriadas a los fines de posibilitar la comprensión del entorno paisajístico del oasis productivo del Valle de Uco en el que se encuentra situada la bodega. También incluyen espacios para el personal de la bodega: vestuarios, baños, cocina, comedor y oficinas de trabajo para el enólogo.

- Ocupación: 0.02 personas por m2.
- Termostato: 20°C – 24°C.
- Renovaciones totales al 0.50 reno/hora en todos los espacios. Mezcla de aires entre zonas 1/hralwayson.

### 5. Sala de máquinas y depósitos: 980 m2 (principalmente en subsuelo)

En las salas de máquinas y depósitos no permanencen las personas, tampoco el personal que trabaja en la bodega.

- Ocupación: 0.01 personas por m2.
- Termostato: sin termostato.
- Renovaciones totales al 0.50 reno/hora en todos los espacios. Mezcla de aires entre zonas 1/hralwayson.

## Resultados

De acuerdo con el proyecto inicial, el consumo actual se estimó en 35,70 kWh/m2 (135.374,40 kWh año), y al efectuarse las mejoras propuestas en la envolvente el consumo se redujo a la mitad, a 18,28 kWh/m2 (69.317,76 kWh año). (Figura 2).A partir de estos resultados se evalúan los consumos futuros en los tres escenarios tentativos 2020, 2050 y 2080. En las Figuras 3,4 y 5 se puede observar respectivamente los resultados en forma comparativa.

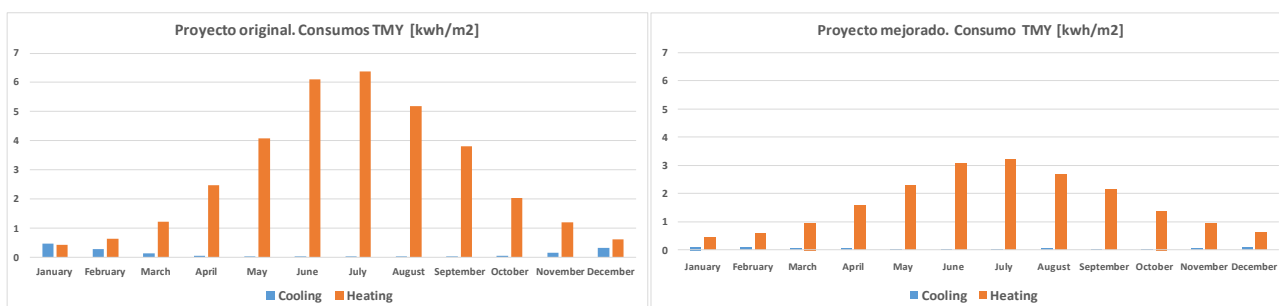


Figura 2. Consumo TMY en kWh m2. De izquierda a derecha: (a) Proyecto Original y (b) Proyecto mejorado.

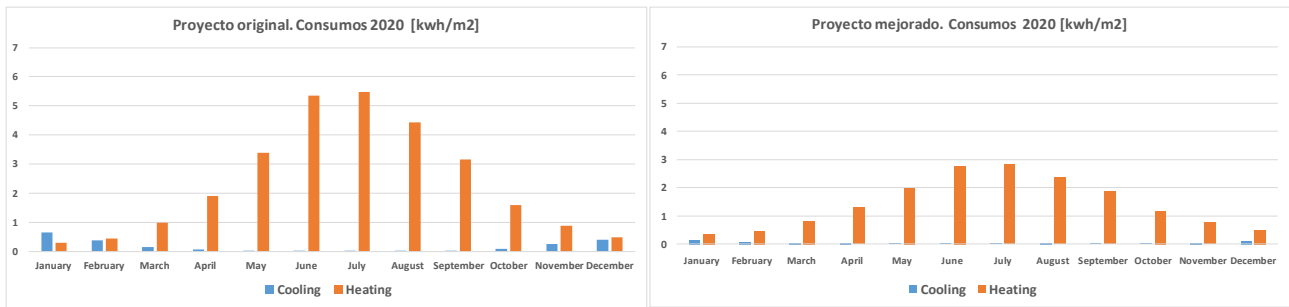


Figura 3. Consumo 2020 en kWh m2. De izquierda a derecha: (a) Proyecto Original y (b) Proyecto mejorado.

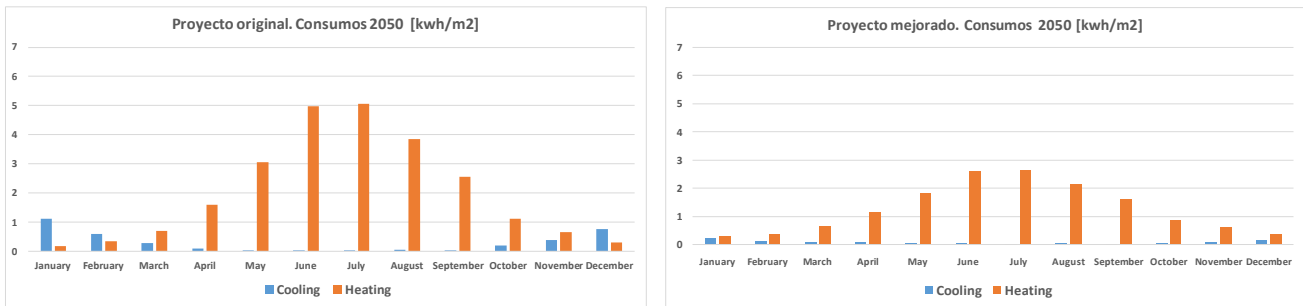


Figura 4. Consumo 2050 en kWh m2. De izquierda a derecha: (a) Proyecto Original y (b) Proyecto mejorado.

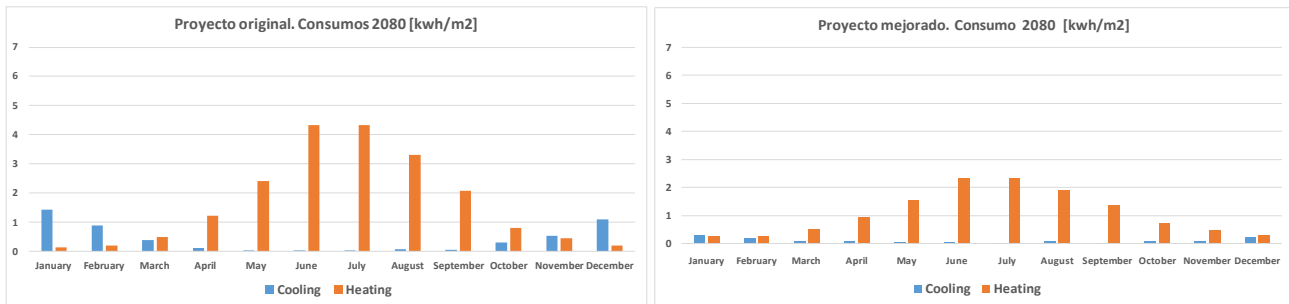


Figura 5. Consumo 2080 en kWh m2. De izquierda a derecha: (a) Proyecto Original y (b) Proyecto mejorado.

El consumo estimado mediante simulación para el año 2020 resulta en un consumo de 30,55 kWh/m2 (115.845,60 kWh año) en el caso del proyecto original y de 16,82 kWh/m2 (63.781,44 kWh año) en el caso del proyecto mejorado. (Figura 3). En el caso de la predicción de consumo energético para el año 2050, el proyecto original consumiría 27,96 kWh/m2 (106.024,32 kWh año) y el proyecto mejorado 15,02 kWh/m2 (56.955,84 kWh año). (Figura 4). Y, para el caso del consumo estimado para el año 2080, el proyecto original consumiría 24,85 kWh/m2 (94.231,20 kWh año) y el proyecto mejorado 14,12 kWh/m2 (53.543,04 kWh año). (Figura 5).

Nótese que al tratarse de un clima frío, el incremento de temperatura previsto por la predicción climática en tres escenarios a futuro resulta favorable en lo que respecta al consumo total edilicio. En el caso del proyecto original, los consumos por calefacción se reducen de 6,3 kWh/m2 en el mes de Julio actual (TMY) a 4,3 kWh/m2 en el mes de Julio del escenario 2080. No obstante, los consumos de refrigeración se triplican en el mes de Enero respectivamente. (De 0,5 kWh/m2 en el mes de Enero actual (TMY) a 1,3 kWh/m2 en el mes de Enero del escenario 2080).

## Discusión y Conclusiones

La Figura 6 presenta una comparación entre la energía total consumida por kWh/m2 en los cuatro escenarios comparados para el caso del proyecto original y para el caso del proyecto con mejoras.

Bajo las condiciones de este estudio, la transmitancia térmica de la envolvente parece tener el mayor impacto en la flexibilidad térmica. También se observó que la masa térmica tiene una influencia secundaria para los indicadores evaluados; su variación solo afecta la flexibilidad térmica si la resistencia térmica de la envolvente es suficiente.

Es interesante este tipo de análisis en el caso de edificios industriales dedicados a la producción vitivinícola en los que los requerimientos de temperatura interior son distintos a los que se deberían contemplar en el caso de la permanencia de personas como es el caso de las viviendas, las escuelas, las oficinas, entre otros. En el caso analizado este tipo de ambientes con termostato fijo entre los 20°C y los 24°C representa sólo el 19% del total de los m<sup>2</sup> involucrados en el proyecto. En conclusión, el edificio con mejoras resulta ser resiliente y se adapta mejor al cambio climático (según el escenario de emisiones A2 del IPCC) manteniendo los consumos energéticos de refrigeración a lo largo de su vida útil, a diferencia del proyecto inicial en el que los consumos energéticos de refrigeración llegan a triplicarse para el año 2080.

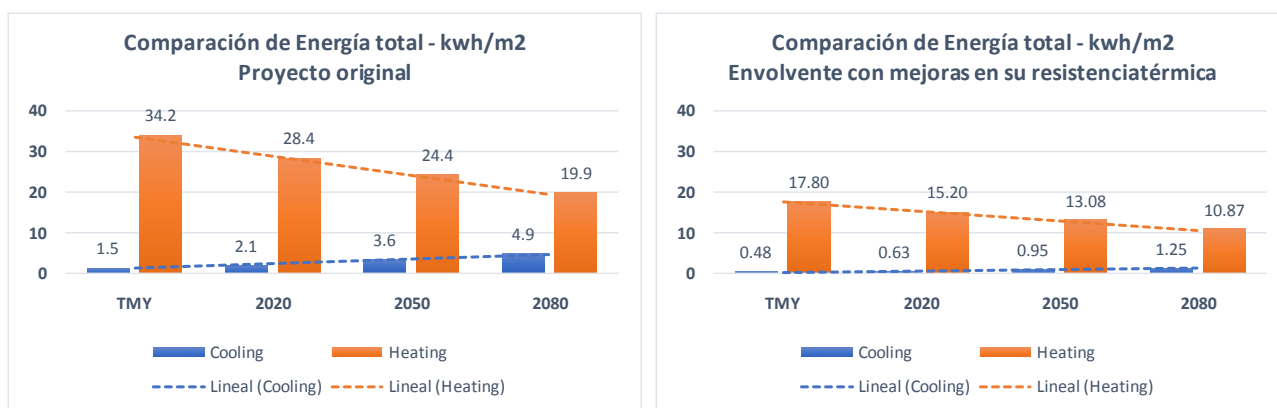


Figura 6. Comparación de predicción de la energía total consumida en kWh/m<sup>2</sup>. De Izquierda a derecha: (a) Proyecto Original y (b) Proyecto mejorado.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la SECTYP-UNCUYO por la financiación del Proyecto de I&D “USO RACIONAL DE LA ENERGÍA Y SUSTENTABILIDAD EN LA INDUSTRIA VITIVINÍCOLA” que posibilitó contar con los recursos económicos para poder desarrollar la presente investigación.

## Referencias

- Achour, N., Price, A. (2010) Resilience strategies of healthcare facilities: present and future. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 1 (3), pp. 264 - 276.
- American Institute of Architects (2012) An Architect's Guide to Integrating Energy Modeling in the Design Process. <http://www.aia.org/practicing/AIAB094452/> Consultado: Agosto 2013.
- Clarke, J. (2001) Energy simulation in building design. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2nd edition.
- Correa, E.N. (2006) Isla de Calor Urbana. El Caso del Área Metropolitana de Mendoza. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Exactas.
- Crawley, D.B; Lawrie, L.K.; Pedersen, C.O. y Winkelman, F.C. (2000). EnergyPlus: Energy Simulation Program. *ASHRAE Journal*. Abril 2000.
- Ganem, C.; Barea, G. y Balter, J. (2015) Evaluación del desempeño ambiental de dos bodegas en Mendoza (Argentina). Propuesta de reacondicionamiento térmico y energético. *Revista Hábitat Sustentable* N° 5 (2015) 4-13. ISSN 0719-0700. Concepción: Univ. del Bio-Bio.
- Instituto Nacional de Vitivinicultura. <http://www.inv.gov.ar/> Consultado: Junio 2000, Junio 2014, Junio 2018.
- IPCC. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (2010). Consultado: Junio 2018 en <http://www.ipcc-data.org>
- IRAM. (2001) Norma Argentina IRAM 11604:2001. Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2009) Anuario de estadística 2009. Fichero coordinado de industrias agroalimentarias 2007-2008. MMAMRM: Madrid. <http://www.agro-alimentarias.coop/ficheros/doc/03200.pdf> Consultado Julio 2018.



- Ministerio de Energía y Minería de la Nación – MINEM (2018) Iniciativas y proyectos. <https://www.minem.gob.ar/www/835/26768/iniciativas-y-proyectos>. Consultado: Mayo de 2018.
- Moreno, J. (2008) La bodega: modelo de arquitectura sostenible. Tesis de Maestría. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Puliafito, E. (2005) Proceso de urbanización y emisiones de gases de efecto invernadero. I Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería EnIDI 2005. Mendoza, Argentina.
- Scofield, J. 2012. The Science Behind Green Building Rating Systems, Written testimony to the U.S. House of Representatives. Technical Report. Oberlin College. <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CHRG-112hhrg74061/pdf/CHRG-112hhrg74061.pdf> Consultado: Junio 2018.
- SERG, Climate Change World Weather File Generator-CCWorldWeatherGen, (2009). Consultado: Junio 2018 en <http://www.energy.soton.ac.uk/ccworldweathergen/>.
- United Nations Energy Programme (2011). What offers governments the greatest potential for reducing GHG emissions at the least cost while creating jobs and improving energy security? Technical Report. Washington: United Nations.
- Unión Europea - UE (2010) DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios. <https://www.boe.es/doue/2010/153/L00013-00035.pdf> Consultado: Mayo 2018.



# Simulación paramétrica de desempeño energético y costo social para centros de salud primaria cero-energía en Chile.

Parametric simulation of energy performance and social budget for zero-energy primary health centers in Chile.

## Alberto Nope Bernal

Filiación: Depto. de Diseño y Teoría de la Arquitectura, Universidad del Bío Bío

Dirección: Collao 1202 Casilla 5-C / C.P: 4081112

Correo: [albertonope@gmail.com](mailto:albertonope@gmail.com)

## Rodrigo García Alvarado

Filiación: Depto. de Diseño y Teoría de la Arquitectura, Universidad del Bío Bío

Dirección: Collao 1202 Casilla 5-C / C.P: 4081112

Correo: [rgarcia@ubiobio.cl](mailto:rgarcia@ubiobio.cl)

**Manuscript Code:** 004

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

## Resumen

Los establecimientos sanitarios son edificaciones complejas, de gran relevancia social y alto consumo energético operativo. El objetivo de esta investigación fue diseñar una estrategia que permitiera evaluar el desempeño energético, potencial solar activo y costos de ciclo de vida de Centros de Salud Familiar (CESFAM) en Chile. Para esto se realizaron modelos volumétricos en el programa Revit exportándolos mediante formato gbXML a DesignBuilder y efectuando simulaciones energéticas multivariadas con un script en Python combinando distintas volumetrías, climas, orientaciones y soluciones constructivas. Para la evaluación solar y de costo social de inversión se utilizó PV Sol Premium y la herramienta ECSE. La evaluación demostró que la adopción de envolventes más aisladas y selladas expresa una reducción progresiva de los requerimientos ambientales y solares activas en todos los ejemplos y situaciones climáticas, por lo que las inversiones en eficiencia energética y tecnologías solares en latitudes australes son significativamente más rentables y con mayor repercusión social. Lo anterior permite indicar que los programas de edificación pública, especialmente en países como Chile, con gran diversidad geográfica, deben considerar una estrategia que permita analizar distinciones del entorno climático para orientar más cabalmente sus recursos, otorgar prestaciones con adecuada calidad ambiental, desempeño energético y rentabilidad social.

Palabras claves: Simulación paramétrica, desempeño energético; costo social; centros de salud primaria; Chile.

## Abstract

Health facilities are complex buildings, of great social relevance and high operational energy consumption. The objective of this research was to design a strategy that would allow the evaluation of energy performance, active solar potential and life cycle costs of Family Health Centers (CESFAM) in Chile. In order to achieve this, volumetric models were made in the Revit program, exporting them using gbXML format to DesignBuilder and performing multivariate energy simulations with a Python script, combining different volumes, climates, orientations and constructive solutions. For solar evaluation and the social investment cost, PV Sol Premium and the ECSE tool were used. The evaluation demonstrated that the adoption of more isolated and sealed envelopes expresses a progressive reduction of the environmental and solar active requirements in all the examples and climatic situations, for which the investments in energy efficiency and solar technologies in southern latitudes are significantly more profitable and with greater social repercussion. This allows us to indicate that public building programs, specially in countries such as Chile, with a wide geographic diversity, should consider a strategy that allows for the analysis of distinctions of the climate environment to better guide their resources, provide benefits with adequate environmental quality, energy performance and social profitability.

Keywords: Parametric simulation, energy performance; social cost; primary health centers; Chile.

## Introducción

El diseño arquitectónico de los centros de salud familiar (CESFAM), considera en general variables como el tamaño de la población, condición socioeconómica, accesibilidad, límites geográficos naturales, políticos y/o administrativos, ordenanza municipal, vialidad, geometría del terreno y programa médico arquitectónico PMA (Claudio Canales Cifuentes, 2008). La combinación de estas variables determina una arquitectura, donde prevalece notoriamente el desempeño operativo del edificio; por lo mismo las tipologías no se diferencian mucho a lo largo del territorio, discrepando con el ambiente natural, social y cultural en el que están insertas. En consecuencia, el centro de salud es entendido como un objeto programado, que busca satisfacer acciones internas en cantidad de espacio y capacidad tecnológica. Asimismo, estos edificios carecen en menor medida de flexibilidad, consecuencia del ritmo de las transformaciones en su programa, adaptaciones a nuevos sistemas técnicos y el crecimiento de algunos servicios, asumiendo también la necesidad de planteamientos sostenibles, con un amplio alcance, desde el control energético (Araujo, 2010). A pesar de esto, su configuración compacta emulada de la tipología hospitalaria “contenedor” parece tener ventajas respecto al ahorro en costes de explotación, debido a la facilidad de mantenimiento, tiempos limitados de ejecución y proximidad de recorridos, contribuyendo a vencer en el personal su resistencia frente al cambio en los procesos de trabajo (Guerras, 2003).

Estos establecimientos se caracterizan por tener un elevado consumo energético operativo, relacionado con la energía de calentamiento, enfriamiento, iluminación y electricidad requerida para mantener cierto nivel de confort (Halverson, M, 2014). (García Sanz, 2014). Por lo tanto, el desempeño energético está fuertemente influenciado por la forma en que las variables de diseño de la envolvente (aislación térmica, hermeticidad, protección solar, entre otros) y arquitectónicas del edificio (orientación, emplazamiento, métrica, forma, relación superficie de envolvente/volumen) se ajustan a las exigencias climáticas del lugar. Desde este punto de vista la reducción de la demanda energética impone patrones de diseño propios, que no necesariamente corresponden con los patrones que dicta la funcionalidad. En el caso de los (CESFAM) esta situación es digna de analizar, ya que hoy se exige que este tipo de edificios aparte de responder a requerimientos funcionales, tenga desempeño energético socialmente aceptable, es decir, demandas energéticas mínimas óptimas y aún más que sean capaces de autogenerar su propia energía (Ministerio de Energía, 2016), lo que a menudo causa contradicciones y edificaciones climáticamente descontextualizadas con elevados costos de inversión y operación. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es diseñar una estrategia para evaluar el comportamiento energético, generación solar y costos sociales de inversión de edificios (CESFAM), a lo largo del territorio chileno, y así, identificar criterios de diseño y medidas que permitan compatibilizar las exigencias funcionales y energéticas, apuntando a un comportamiento de auto-generación y mínimo consumo (cero-energía).

## Estado del arte del problema

Distintos son los recursos a los cuales diseñadores y especialistas pueden acudir para proyectar centros de salud energéticamente eficientes; por ejemplo la Guía de Diseño de Energía Avanzada para Pequeños Hospitales e Instalaciones de Salud de los Estados Unidos (Eric Bonnema, Shanti Pless, 2010) (Bonnema, Doebber, Pless, & Torcellini, 2010) brinda recomendaciones para el diseño y operación eficiente, con el objetivo de reducir cerca de un 30% el consumo de energía frente al estándar establecido por el código ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2013 (Halverson, M, 2014).

A nivel nacional, la Agencia Chilena de Eficiencia energética AChEE, desarrolló en el marco del programa de apoyo a la gestión de proyectos de edificación pública de alta eficiencia energética, una guía que permite orientar el diseño arquitectónico de forma eficiente en etapas tempranas de diseño aplicando estrategias pasivas y activas según zona climática. Por su lado, el Ministerio de Obras Públicas (MOP), a través de su Dirección de Arquitectura, ha trabajado en la incorporación de criterios de eficiencia energética y sustentabilidad en las Obras Públicas, estableciendo Términos de Referencia Estandarizados (TDR), para diseñar y construir edificios con mejorados estándares ambientales.

Las estrategias, métodos y herramientas descritas, definen parámetros de diseño eficiente para distintas zonas climáticas, sin embargo, no existe una estrategia que permita evaluar el desempeño energético, generación solar y costos sociales para edificios cero-energía, compatibilizando prestaciones funcionales y energéticas según zona climática.

## Metodología

La estrategia de evaluación inició con la caracterización arquitectónica y constructiva (Tabla 1) de cinco Centros de Salud Familiar (CESFAM) que se encuentran en proceso de licitación para su construcción. La figura 2 describe la estrategia y herramientas de simulación energética, generación solar y costo social, así como las variables de análisis.



Figura 1. Esquema general de estrategia para la evaluación energética y costos sociales de inversión para centros de salud primaria. Elaboración propia.

## Evaluación energética

La estrategia de evaluación energética (Figura 2) consistió en la elaboración de cinco modelos volumétricos utilizando el programa Revit Architecture. La construcción de los modelos respetó las principales características arquitectónicas y constructivas de cada caso. Posteriormente estos modelos se exportaron mediante formato gbXML a DesignBuilder, configurando escenarios base que incorporaron horarios de operación, cargas de ocupación, equipos, iluminación, rangos de temperatura y tipo de construcción (Sin TDRe). Una vez configurados los escenarios, mediante archivos de datos de entrada Input Data File, IDF, se realizó un script en Python (Lenguaje de programación multiparadigma), para simular de forma multivariadas distintos escenarios combinando volumetría, orientación, ubicación geográfica, control solar, hermeticidad, y calidad constructiva mejorada y optimizada.

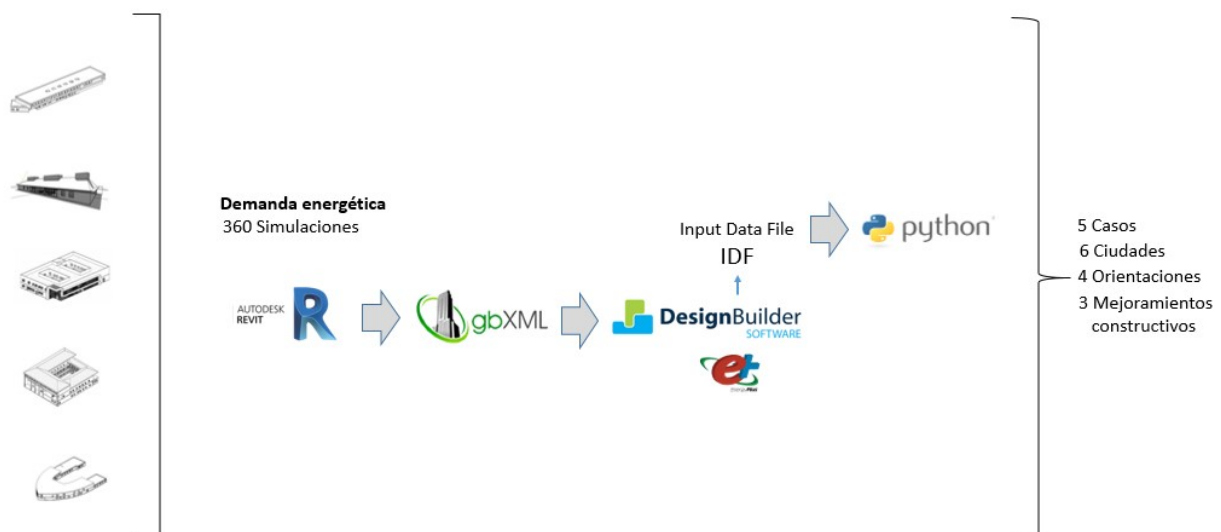
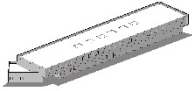
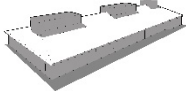
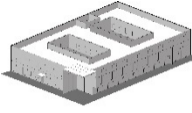
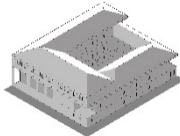
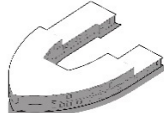




Figura 2. Esquema general de estrategia para la evaluación energética en centros de salud primaria. Elaboración propia.

Tabla 1. Caracterización arquitectónica y constructiva de casos estudio. Elaboración propia.

|                                  | CASO 1   | CASO 2  | CASO 3  | CASO 4  | CASO 5  |
|----------------------------------|--|---|---|---|---|
|                                  |   |  |  |  |                    |
| Localización                     | Algarrobo, Región de Valparaíso<br>-33,36 / -71,67   | Curepto, Región del Maule<br>-35,09 / -72,02                                      | Santiago, Región Metropolitana<br>-33,46 / -70,64                                 | Concepción, Región del Bío Bío<br>-36,82 / 73,04                                    | Dalcahue, Región de los lagos<br>-42,37 / -73,65  |
| Zona climática                   | 4CL Centro Litoral   | 5Cl; Central  | 5Cl; Central  | 6SL Sur Litoral   | 8SE Sur Extremo   |
| Área de parcela                  | 22.000m <sup>2</sup>   | 53.162m <sup>2</sup>  | 2.500m <sup>2</sup>   | 4.500m <sup>2</sup>   | 4.333m <sup>2</sup>   |
| Usuarios a atender               | 10.000 / año.  | 5.000 / Año.  | 30.000 / Año  | 30.000 / Año  | 20.000 / Año  |
| Número de pisos                  | 2  | 1   | 2   | 3   | 2   |
| Altura libre                     | 2,6  | 2,90  | 2,75  | 3,15  | 2,70  |
| Número de patios                 | 0  | 3   | 2   | 1   | 1   |
| Superficie construida            | 1.970m <sup>2</sup>  | 1.146m <sup>2</sup>   | 2.687m <sup>2</sup> .   | 3.789m <sup>2</sup>   | 2.346m <sup>2</sup>   |
| Superficie de cubierta           | 1.163 m <sup>2</sup> .   | 1.125 m <sup>2</sup>  | 1.552 m <sup>2</sup>  | 1.193 m <sup>2</sup>  | 1.338 m <sup>2</sup>  |
| Superficie de envolvente         | 2.500 m <sup>2</sup>   | 1.687 m <sup>2</sup>  | 2.834 m <sup>2</sup>  | 3.442 m <sup>2</sup>  | 2.336 m <sup>2</sup>  |
| Volumen                          | 5.300 m <sup>3</sup>   | 3.307 m <sup>3</sup>  | 7.262 m <sup>3</sup>  | 9.469 m <sup>3</sup>  | 5.256 m <sup>3</sup>  |
| Materialidad/ Muros              | Hormigón armado con acabado exterior en piedra y litrofen (acabado exterior a base de cemento, cal, espejuelo y pigmento), | Hormigón armado con acabado exterior en EIFS (Exterior Insulation Finish Systems) |   |   | Hormigón armado con acabado exterior en placa fundermax (paneles de madera laminados de alta presión) |
| Ventanas                         | Termo panel con perfilería de PVC  |   |   |   |   |
| Pisos en contacto con el terreno | Hormigón con aislación en poliestireno expandido   |   |   |   |   |
| Cubierta                         | Lamina de fierro galvanizado, con aislación en poliestireno expandido.   |   |   |   |   |
| Pendiente de cubierta            | 5%   | 35%   | 10%   | 15%   | 5%  |

### Evaluación solar

Mediante PV Sol Premium se realizaron simulaciones de generación solar conectada a red (potencia instalada) calculada en función de la demanda energética requerida. Se considerando para el cálculo la orientación, calidad constructiva, localización y superficie de cubierta útil en cada uno de los casos. Se contempló una ocupación inicial del 100% a la cual se le descontó un 30% para dar espacio a equipos de clima y ventilación. La figura 3 describe el esquema general de simulación para cada uno de los casos de estudio.

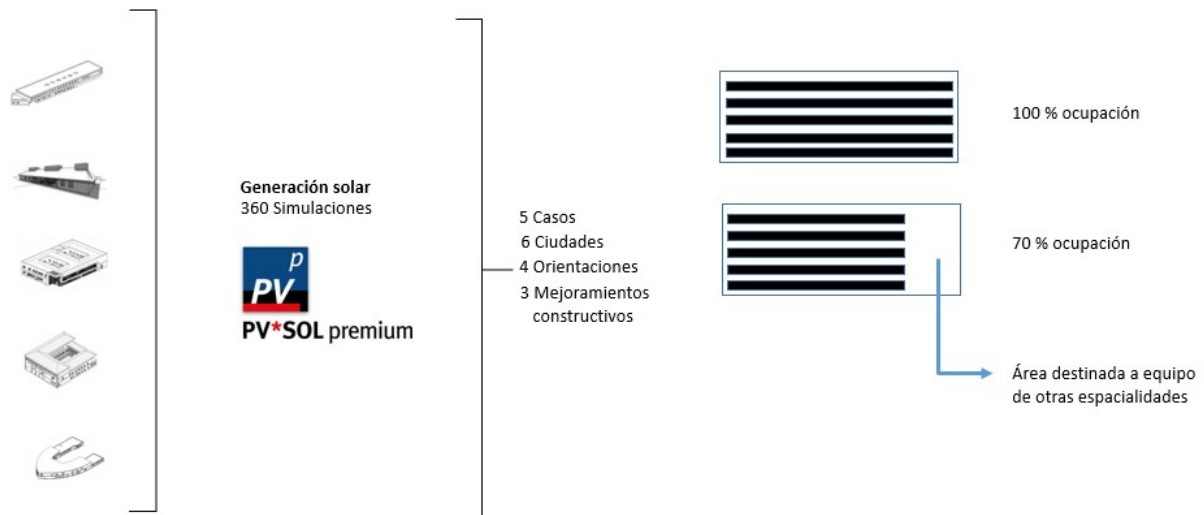


Figura 3. Esquema general de estrategia para la evaluación energética solar en centros de salud primaria. Elaboración propia.

### Evaluación de costo social de inversión

Los costos sociales de inversión se analizaron mediante la herramienta ECES (Eficiencia y Costes sociales en Edificios) (Tabla 3) la cual se basa en el análisis de costo de ciclo de vida (LCC) en la forma que explica la Norma ASTM e917, 2013: Standard Practice for Measuring Life-Cycle Costs of Building Systems. Esta herramienta determina el flujo de costos actualizado neto, durante un periodo definido como de ciclo de vida; que se asocian a los servicios de calefacción, refrigeración, iluminación, ventilación y provisión de agua. La rentabilidad de los distintos proyectos de intervención resulta de comparar, a valor presente, los costos sociales acumulados durante el ciclo de operación del edificio, bajo escenarios BASE, MEJORADO Y OPTIMIZADO. Asimismo, los costos iniciales y de ciclo de vida asociados a la implementación de tecnologías solares en cada uno de los casos se obtuvo mediante PV Sol Premium.

### Resultados

La simulación realizada a cada uno de los casos evidencia un aumento y/o reducción de la demanda y generación solar según localización, justificando la inversión económica en estrategias de eficiencia energética mayormente para latitudes australes. Asimismo, la evaluación energética de un mismo caso en distintas latitudes permitió identificar el mejor desempeño asociado a distinto tipo de construcción. La tabla 5 describe los resultados promedio de orientación para demanda energética, generación solar y costos sociales de inversión, operación energética y ciclo de vida de cada uno de los casos y calidad constructiva (BASE, MEJORADA Y OPTIMIZADA).

Tabla 2. Datos de entrada en herramienta ECSE para la evaluación de costos sociales de inversión caso 1 orientación norte.

| Herramienta ECSE (Eficiencia y Costes Sociales en Edificios) |  |  |                                  |   |   |                                   |  |  |   |                               |                         |                       |
|--|--|--|----------------------------------|---|---|-----------------------------------|--|--|---|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Región   | Antofagasta                            |  |                                  | Superficie Útil (m²)                    | 1200,00                                   | Uso                               | Edificio de salud                            |  | Limpieza                                |                               |                         |                       |
| Comuna   | Calama                                 |  |                                  | Altura entre plantas (m)                | 3,00                                      | Intensidad de uso                 | Intensidad Alto - 12h                        |  | Calcular                                |                               |                         |                       |
| Provincia  | El Loa                                 |  |                                  | Número de plantas                       | 1,00                                      | Inercia térmica                   | Alta   |  | LCCA                                    |                               |                         |                       |
| Dirección  |  |  |                                  | Superficie Útil Calefac. (m²)           | 300,00                                    | Calendario de uso                 | L-D  |  | Guardar PDF                             |                               |                         |                       |
| Latitud (S)  | 22°28'00"                              |  |                                  | Superficie Útil Refrig. (m²)            | 300,00                                    |                                   |  |  |   |                               |                         |                       |
| Longitud (W)   | 68°56'00"                              |  |                                  | Equipo de calefacción                   | Bomba de calor agua-agua o agua-aire      |                                   | Energía                                      | Electricidad                           |   |                               |                         |                       |
| Zona climática   | 3AN                                    |  |                                  | Equipo de refrigeración                 | Bomba de calor agua-agua o agua-aire      |                                   | Energía                                      | Electricidad                           |   |                               |                         |                       |
|  | Fachada Norte                          | Fachada Noreste                          | Fachada Este                     | Fachada Sur                             | Fachada Oeste                             | Fachada Noroeste                  | Muros no soleados                            | Techumbres                             | Pisos en contacto con el                | Pisos ventilados              | Cerramiento en contacto | Superficie Total (m²) |
| Superficie (m²)  | 155,00                                 | 1,00                                     | 74,00                            | 154,00                                  | 471,00                                    | 1,00                              | 623,00                                       | 1254,00                                | 1146,00                                 | 1,00                          | 100,00                  | 3986,00               |
| % Vanos  | 21,00                                  | 1,00                                     | 5,00                             | 43,00                                   | 1,00                                      | 1,00                              | 8,00   |  |   |                               |                         |                       |
| Envoltorio Base  | Hormigón                               | Hormigón                                 | Hormigón                         | Hormigón                                | Hormigón                                  | Hormigón                          | Hormigón                                     | Metálica                               | Hormigón                                | Hormigón                      | Hormigón                |                       |
| Uopaco (Base) W/m²K  | 3,43                                   | 3,43                                     | 3,43                             | 3,43                                    | 3,43                                      | 3,43                              | 3,43   | 2,63                                   | 2,60                                    | 2,60                          | 3,43                    |                       |
| Uvanos (Base) W/m²K  | 5,80                                   | 5,80                                     | 5,80                             | 5,80                                    | 5,80                                      | 5,80                              | 5,80   |  |   |                               |                         |                       |
| Factor Solar (Base)  | 0,85                                   | 0,85                                     | 0,85                             | 0,85                                    | 0,85                                      | 0,85                              |  |  |   |                               |                         |                       |
| Mejora propuesta opaco                                       | TDRc                                   | TDRc                                     | TDRc                             | TDRc                                    | TDRc                                      | TDRc                              | TDRc   | TDRc                                   | TDRc                                    |                               |                         |                       |
| Mejora propuesta vanos                                       | TDRc                                   | TDRc                                     | TDRc                             | TDRc                                    | TDRc                                      | TDRc                              | TDRc   |  |   |                               |                         |                       |
| Protección solar vanos                                       | Celosías                               | Celosías                                 | Base                             |   | Base                                      | Base                              |  |  |   |                               |                         |                       |
| Uopaco (Mejorado) W/m²K                                      | 0,30                                   | 0,30                                     | 0,30                             | 0,30                                    | 0,30                                      | 0,30                              | 0,30   | 0,25                                   | 0,35                                    | 2,60                          |                         | 3,43                  |
| R. térmica aislamiento (m²K/W)                               | 3,04                                   | 3,04                                     | 3,04                             | 3,04                                    | 3,04                                      | 3,04                              | 3,04   | 3,62                                   | 2,47                                    |                               |                         |                       |
| UVanos (Mejorado) W/m²K                                      | 3,50                                   | 3,50                                     | 3,50                             | 2,10                                    | 3,50                                      | 3,50                              | 3,50   |  |   |                               |                         |                       |
| F.solar (Mejorado) (BC)                                      | 0,85                                   | 0,85                                     | 0,85                             |   | 0,85                                      | 0,85                              |  |  |   |                               |                         |                       |
| F.solar (Mejorado) (AC)                                      | 0,85                                   | 0,85                                     | 0,85                             |   | 0,85                                      | 0,85                              |  |  |   |                               |                         |                       |
| Infiltraciones - Envoltorio                                  | Sistema mecánico de ventilación        |  |                                  | SI                                      | Renovaciones/hora (Base)                  | 1,29                              | Implementar TDRc                             | Renovaciones / hora (M)                | 0,03                                    |                               |                         |                       |
| PERMEABILIDAD AL AIRE - VENTAN                               | Mínimo                                 | -  | Normal                           | -                                       | Especial                                  | -                                 | Reforzada                                    | 7s                                     |   |                               |                         |                       |
| <b>Instalaciones Edificio Mejorado</b>                       |  |  |                                  |   |   |                                   |  |  |   |                               |                         |                       |
| Climatización  | Equipo de calefacción                  |  |                                  |   | VRV                                       |                                   |  | Energía                                | Electricidad                            | Iluminación                   |                         |                       |
|  | Equipo de refrigeración                |  |                                  |   | VRV                                       |                                   |  | Energía                                | Electricidad                            | LED                           |                         |                       |
| <b>Resultados</b>  |  |  |                                  |   |   |                                   |  |  |   |                               |                         |                       |
|  | Demanda Calefacción Estimada [W/m²]/m² | Demanda Refrigeración Estimada [W/m²]/m² | Demanda Total Estimada [W/m²]/m² | Consumo Calefacción Estimado [W/m²]/año | Consumo Refrigeración Estimado [W/m²]/año | Consumo Total Estimado [W/m²]/año | Costos Totales Estimados Energía [UF/m²]/año | Costos Estimados Materiales EE [UF/m²] | Costos Estimados de vida (LCCA) [UF/m²] | Emisiones de CO2 [T CO2e]/año | IT                      | Payback [Años]        |
| Base   | 79,88                                  | 4,25                                     | 84,14                            | 28,53                                   | 1,52                                      | 30,24                             | 0,07   | 4,41                                   | 3,05                                    | 8,76                          | 10,89                   | -                     |
| Mejorado   | 10,03                                  | 10,32                                    | 20,41                            | 2,88                                    | 2,35                                      | 5,84                              | 0,01   | 4,82                                   | 4,74                                    | 3,81                          | 2,10                    | 8,00                  |
| Optimizado   | 8,56                                   | 10,38                                    | 19,54                            | 2,44                                    | 3,14                                      | 5,60                              | 0,01   | 4,79                                   | 4,74                                    | 3,76                          | 2,01                    | 7,00                  |
| Dif., ahorro o reducciones Mejorado (%)                      | 87,37                                  | -142,74                                  | 75,74                            | 89,30                                   | -94,19                                    | 80,68                             | 80,68  | -9,26                                  | -55,28                                  | 0,12                          | 80,68                   | -                     |
| Dif., ahorro o reducciones Optimizado (%)                    | 89,29                                  | -158,32                                  | 76,78                            | 91,43                                   | -106,66                                   | 81,50                             | 81,50  | -8,52                                  | -55,28                                  | 0,12                          | 81,50                   | -1,00                 |

| Tasa descuento  | 6%                               |                                      |                                 | CANTIDAD (m²)                   | BASE        |                |                | MEJORADO    |                |                | OPTIMIZADO  |                |                |
|---|----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------|----------------|----------------|-------------|----------------|----------------|-------------|----------------|----------------|
|   | Costo UF/m²                      | Costo estimado                       | Valor presente                  |                                 | Costo UF/m² | Costo estimado | Valor presente | Costo UF/m² | Costo estimado | Valor presente | Costo UF/m² | Costo estimado | Valor presente |
| Periodo estudio   | 20                               |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| <b>INVERSIÓN INICIAL</b>  |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| Estructura  | Fachada Norte                    | Hormigón                             | EIFS-10cm2XPS                   | EIFS-10cm2XPS                   | 122,45      | -              | -              | -           | 0,92           | 112,84         | 112,84      | 0,92           | 112,84         |
|   | Fachada Noreste                  | Hormigón                             | EIFS-10cm2XPS                   | EIFS-10cm2XPS                   | 0,39        | -              | -              | -           | 0,92           | 0,31           | 0,31        | 0,92           | 0,31           |
|   | Fachada Este                     | Hormigón                             | EIFS-10cm2XPS                   | EIFS-10cm2XPS                   | 70,30       | -              | -              | -           | 0,92           | 64,78          | 64,78       | 0,92           | 64,78          |
|   | Fachada Sur                      | Hormigón                             | EIFS-10cm2XPS                   | EIFS-10cm2XPS                   | 78,54       | -              | -              | -           | 0,92           | 72,38          | 72,38       | 0,92           | 72,38          |
|   | Fachada Oeste                    | Hormigón                             | EIFS-10cm2XPS                   | EIFS-10cm2XPS                   | 466,29      | -              | -              | -           | 0,92           | 429,71         | 429,71      | 0,92           | 429,71         |
|   | Fachada Noroeste                 | Hormigón                             | EIFS-10cm2XPS                   | EIFS-10cm2XPS                   | 0,39        | -              | -              | -           | 0,92           | 0,31           | 0,31        | 0,92           | 0,31           |
|   | Muros no soleados                | Hormigón                             | EIFS-10cm2XPS                   | EIFS-10cm2XPS                   | 578,68      | -              | -              | -           | 0,92           | 533,28         | 533,28      | 0,92           | 533,28         |
|   | Techumbres                       | Metálica                             | EIFS-15cm2XPS                   | EIFS-15cm2XPS                   | 1254,00     | -              | -              | -           | 0,25           | 315,90         | 315,90      | 0,25           | 315,90         |
|   | Pisos en contacto con el terreno | Hormigón                             | EIFS-10cm2XPS                   | EIFS-10cm2XPS                   | 1146,00     | -              | -              | -           | 0,11           | 196,63         | 196,63      | 0,11           | 196,63         |
|   | Pisos ventilados                 | Hormigón                             | EIFS-10cm2XPS                   | EIFS-10cm2XPS                   | 1,00        | -              | -              | -           | 0,00           | 0,00           | 0,00        | 0,00           | 0,00           |
| Vanos   | Cerramiento en contacto terreno  | Hormigón                             | EIFS-10cm2XPS                   | EIFS-10cm2XPS                   | 100,00      | -              | -              | -           | 0,00           | 0,00           | 0,00        | 0,00           | 0,00           |
|   | Fachada Norte                    | PVC y vidrio de 5 mm                 | PVC y DVH 6/12/6                | PVC y DVH 6/12/6                | 32,55       | 7,03           | 228,68         | 228,68      | 7,89           | 258,86         | 258,86      | 7,89           | 258,86         |
|   | Fachada Noreste                  | PVC y vidrio de 5 mm                 | PVC y DVH 6/12/6                | PVC y DVH 6/12/6                | 0,01        | 7,03           | 0,07           | 0,07        | 7,89           | 0,08           | 0,08        | 7,89           | 0,08           |
|   | Fachada Este                     | PVC y vidrio de 5 mm                 | PVC y DVH 6/12/6                | PVC y DVH 6/12/6                | 3,70        | 7,03           | 25,39          | 25,39       | 7,89           | 23,20          | 23,20       | 7,89           | 23,20          |
|   | Fachada Sur                      | PVC y vidrio de 5 mm                 | PVC y DVH Low E 6/12/6          | PVC y DVH Low E 6/12/6          | 75,46       | 7,03           | 530,14         | 530,14      | 8,52           | 642,94         | 642,94      | 8,52           | 642,94         |
|   | Fachada Oeste                    | PVC y vidrio de 5 mm                 | PVC y DVH 6/12/6                | PVC y DVH 6/12/6                | 4,71        | 7,03           | 33,09          | 33,09       | 7,89           | 31,17          | 31,17       | 7,89           | 31,17          |
|   | Fachada Noroeste                 | PVC y vidrio de 5 mm                 | PVC y DVH 6/12/6                | PVC y DVH 6/12/6                | 0,01        | 7,03           | 0,07           | 0,07        | 7,89           | 0,08           | 0,08        | 7,89           | 0,08           |
|   | Muros no soleados                | PVC y vidrio de 5 mm                 | PVC y DVH 6/12/6                | PVC y DVH 6/12/6                | 50,32       | 7,03           | 353,52         | 353,52      | 7,89           | 397,08         | 397,08      | 7,89           | 397,08         |
|   | Fachada Norte                    | Base                                 | Sin celosías                    | Base                            | 32,55       | -              | -              | -           | 4,06           | 132,15         | 132,15      | 0,00           | 0,00           |
|   | Fachada Noreste                  | Base                                 | Sin celosías                    | Base                            | 0,01        | -              | -              | -           | 4,06           | 0,04           | 0,04        | 0,00           | 0,00           |
| Protección solar  | Fachada Este                     | Base                                 | Base                            | Base                            | 3,70        | -              | -              | -           | 0,00           | 0,00           | 0,00        | 0,00           |                |
|   | Fachada Oeste                    | Base                                 | Base                            | Base                            | 4,71        | -              | -              | -           | 0,00           | 0,00           | 0,00        | 0,00           |                |
|   | Fachada Noroeste                 | Base                                 | Base                            | Base                            | 0,01        | -              | -              | -           | 0,00           | 0,00           | 0,00        | 0,00           |                |
|   | Fachada Noroeste                 | Base                                 | Base                            | Base                            | 0,01        | -              | -              | -           | 0,00           | 0,00           | 0,00        | 0,00           |                |
| Hermeticidad  | Hermeticidad                     | Hormigón                             | Hormigón_Optimizado             | Hormigón_Optimizado             | 166,76      | -              | -              | -           | 0,05           | 8,19           | 8,19        | 0,05           | 8,19           |
|   |                                  |                                      | Sellos de carpinterías y folgas | Sellos de carpinterías y folgas |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| Instalaciones   | Calefacción                      | Bomba de calor agua-agua o agua-aire | VRV                             | VRV                             | 300,00      | 2,27           | 2043,00        | 2043,00     | 1,34           | 1201,74        | 1201,74     | 1,34           | 1201,74        |
|   | Refrigeración                    | de calor agua-agua o agua-aire       | VRV                             | VRV                             | 300,00      | 2,27           | 2043,00        | 2043,00     | 1,34           | 1201,74        | 1201,74     | 1,34           | 1201,74        |
|   | Iluminación                      | T8                                   | LED                             | LED                             | 1200,00     | 0,03           | 39,87          | 39,87       | 0,13           | 153,25         | 153,25      | 0,13           | 153,25         |
| <b>TOTAL COSTOS INICIALES Y COLATERALES</b>                                   |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| <b>DIFERENCIA COSTOS (Mejorado-Base)(Optimizado-Base)</b>                     |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
|   |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| <b>MANTENIMIENTO</b>  |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| Instalaciones   | Cerramientos (Muros)             |                                      |                                 |                                 | 1318,24     | 0,08           | 222,80         | 1658,07     | 0,08           | 334,35         | 2372,16     | 0,08           | 334,35         |
|   | Calefacción                      |                                      |                                 |                                 | 300,00      | 0,07           | 61,3           | 702,39      | 0,03           | 24,03          | 275,68      | 0,03           | 24,03          |
|   | Refrigeración                    |                                      |                                 |                                 | 300,00      | 0,07           | 61,3           | 702,39      | 0,03           | 24,03          | 275,68      | 0,03           | 24,03          |
|   | Iluminación                      |                                      |                                 |                                 | 1200,00     | 0,01           | 55,20          | 607,20      | 0,13           | 215,68         | 215,68      | 0,13           | 215,68         |
| <b>TOTAL COSTOS REEMPLAZO / VIDA RESIDUAL</b>                                 |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| <b>DIFERENCIA COSTOS (Mejorado-Base)(Optimizado-Base)</b>                     |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
|   |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| <b>Costos Anuales Consumo Energético</b>                                      |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| Instalaciones   | Calefacción                      | Electricidad                         | Electricidad                    | Electricidad                    | 900,00      | 0,07           | 78,04          | 1462,46     | 0,01           | 7,89           | 147,78      | 0,01           | 6,63           |
|   | Refrigeración                    | Electricidad                         | Electricidad                    | Electricidad                    | 300,00      | 0,00           | 4,15           | 77,84       | 0,01           | 8,07           | 151,17      | 0,01           | 8,58           |
|   | Iluminación                      | Electricidad                         | Electricidad                    | Electricidad                    | 1200,00     | 0,00           | 0,53           | 3,84        | 0,00           | 0,03           | 0,62        | 0,00           | 0,03           |
|   |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| <b>TOTAL COSTOS ANUALES CONSUMO ENERGÉTICO</b>                                |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| <b>DIFERENCIA COSTOS CONSUMO ENERGÉTICO (Base-Mejorado) (Base-Optimizado)</b> |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
|   |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| <b>COSTOS DE CICLO DE VIDA (LCCA)</b>   |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| <b>Diferencia LCCA (Mejorado-Base)(Optimizado-Base)</b>                       |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| <b>Varianza LCCA (Mejorado-Base)(Optimizado-Base)</b>                         |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |
| <b>Payback (Años)</b>   |                                  |                                      |                                 |                                 |             |                |                |             |                |                |             |                |                |

Tabla 3. Demanda energética, generación solar y costos sociales de inversión según localización y calidad constructiva. Elaboración propia.

| Caso | Ciudad       | BASE   |   |                           |   |   |  | MEJORADO   |   |                           |   |   |  | OPTIMIZADO                                       |   |                           |   |   |  |       |          |         |
|------|--------------|--|---|---------------------------|---|---|--|--|---|---------------------------|---|---|--|--|---|---------------------------|---|---|--|-------|----------|---------|
|      |              | Demanda promedio solar PV KWh/m <sup>2</sup> año | Generación promedio solar PV KWh/m <sup>2</sup> año | Costo inicial promedio UF | Costo promedio de reemplazo y valor residual UF/año | Costo promedio de consumo energético UF/año | Costo promedio de ciclo de vida UF / 20 años | Demanda promedio solar PV KWh/m <sup>2</sup> año | Generación promedio solar PV KWh/m <sup>2</sup> año | Costo inicial promedio UF | Costo promedio de reemplazo y valor residual UF/año | Costo promedio de consumo energético UF/año | Costo promedio de ciclo de vida UF / 20 años | Demanda promedio solar PV KWh/m <sup>2</sup> año | Generación promedio solar PV KWh/m <sup>2</sup> año | Costo inicial promedio UF | Costo promedio de reemplazo y valor residual UF/año | Costo promedio de consumo energético UF/año | Costo promedio de ciclo de vida UF / 20 años |       |          |         |
| 1    | Calama       | 56,71  | 56,14   | 5756,04                   | 3348,60   | 172,25                                      | 12585,22                                     | 4318,07  | 35,06   | 34,33                     | 5857,42   | 6611,50                                     | 27,71  | 12816,17   | 2224,46   | 32,66                     | 32,27   | 5397,01                                     | 6478,64                                      | 19,57 | 12242,40 | 2074,69 |
| 2    |              | 81,45  | 77,38   | 3483,07                   | 3948,60   | 172,25                                      | 12585,22                                     | 3264,36  | 60,54   | 59,30                     | 4333,32   | 5380,03                                     | 17,60  | 10043,24   | 2292,70   | 39,66                     | 38,94   | 3950,64                                     | 5302,70                                      | 12,49 | 9486,19  | 1505,49 |
| 3    |              | 103,58   | 69,02   | 10928,15                  | 5636,57   | 305,73                                      | 22640,67                                     | 5519,59  | 80,41   | 67,71                     | 13623,51  | 10603,30                                    | 43,61  | 25044,08   | 5373,65   | 67,06                     | 64,23   | 11553,05                                    | 10422,10                                     | 30,83 | 22552,78 | 5045,29 |
| 4    |              | 41,49  | 36,92   | 9493,54                   | 7753,14   | 319,48                                      | 23702,03                                     | 4766,70  | 32,94   | 32,21                     | 8942,51   | 14595,56                                    | 61,99  | 24699,77   | 4139,85   | 26,76                     | 26,35   | 8621,07                                     | 14340,12                                     | 43,95 | 23784,72 | 3387,62 |
| 5    |              | 52,19  | 51,81   | 6094,39                   | 4497,27   | 198,65                                      | 14605,27                                     | 4400,35  | 32,98   | 31,73                     | 5869,94   | 8602,66                                     | 33,36  | 15097,66   | 2733,22   | 30,36                     | 29,69   | 5538,01                                     | 8444,47                                      | 23,79 | 14428,33 | 2521,22 |
| 1    | Santiago     | 115,25   | 62,31   | 8102,33                   | 5556,35   | 175,82                                      | 17204,67                                     | 5774,76  | 38,77   | 38,25                     | 7568,47   | 7325,10                                     | 28,46  | 15426,98   | 3530,60   | 28,80                     | 28,33   | 7566,96                                     | 7059,56                                      | 20,11 | 15053,31 | 2577,60 |
| 2    |              | 192,27   | 82,65   | 19462,75                  | 4399,45   | 169,85                                      | 12700,88                                     | 4548,46  | 63,23   | 65,25                     | 5355,24   | 5954,75                                     | 19,10  | 11667,92   | 3569,45   | 35,42                     | 41,05   | 5286,98                                     | 5800,28                                      | 13,48 | 11339,93 | 2233,84 |
| 3    |              | 210,70   | 48,63   | 14155,93                  | 8762,14   | 304,64                                      | 29071,60                                     | 6309,88  | 93,45   | 48,79                     | 15739,32  | 11683,38                                    | 43,92  | 28245,80   | 6309,88   | 66,46                     | 48,79   | 14659,91                                    | 11321,11                                     | 31,07 | 26563,24 | 6309,88 |
| 4    |              | 78,96  | 26,89   | 13994,11                  | 12088,89  | 312,69                                      | 32387,36                                     | 4942,37  | 33,28   | 26,89                     | 12220,30  | 16094,64                                    | 58,60  | 29413,01   | 4942,37   | 28,05                     | 25,36   | 12682,37                                    | 9185,30                                      | 41,58 | 29045,52 | 4649,59 |
| 5    |              | 105,04   | 52,54   | 8882,26                   | 7160,88   | 200,20                                      | 20079,90                                     | 6413,93  | 33,46   | 33,02                     | 7882,01   | 9501,51                                     | 34,02  | 18021,09   | 4035,05   | 25,88                     | 25,50   | 8055,81                                     | 9185,30                                      | 24,27 | 17695,86 | 3116,16 |
| 1    | Valparaíso   | 105,77   | 49,55   | 8054,83                   | 5342,46   | 131,84                                      | 16073,06                                     | 5774,76  | 44,69   | 44,09                     | 7319,60   | 7019,09                                     | 30,77  | 14915,21   | 5112,63   | 33,70                     | 33,03   | 7377,84                                     | 6753,56                                      | 21,83 | 14540,50 | 3818,31 |
| 2    |              | 171,71   | 49,55   | 4880,88                   | 4060,16   | 124,89                                      | 16073,06                                     | 4548,46  | 70,93   | 44,09                     | 5623,27   | 6161,76                                     | 20,06  | 11623,83   | 4466,94   | 41,07                     | 44,69   | 5042,42                                     | 5291,17                                      | 14,55 | 10690,22 | 3079,60 |
| 3    |              | 191,03   | 38,56   | 14009,07                  | 8239,19   | 224,99                                      | 26827,68                                     | 6309,88  | 98,71   | 38,69                     | 15245,59  | 10935,22                                    | 45,95  | 27041,86   | 6309,88   | 71,69                     | 38,69   | 14208,44                                    | 10572,98                                     | 32,62 | 25392,69 | 6309,88 |
| 4    |              | 71,77  | 21,33   | 13944,79                  | 11403,39  | 233,42                                      | 30081,45                                     | 5655,85  | 36,48   | 21,33                     | 11831,65  | 15113,92                                    | 61,65  | 28100,83   | 5655,85   | 30,13                     | 21,33   | 12303,72                                    | 14603,21                                     | 43,86 | 27729,01 | 5655,85 |
| 5    |              | 96,93  | 41,90   | 8845,96                   | 6799,81   | 150,00                                      | 18688,63                                     | 6413,93  | 39,14   | 38,53                     | 7606,75   | 8984,94                                     | 36,81  | 17281,52   | 5902,31   | 29,21                     | 28,84   | 7791,22                                     | 8668,72                                      | 26,28 | 16952,40 | 4417,99 |
| 1    | Concepción   | 103,30   | 53,81   | 8033,88                   | 5248,15   | 214,69                                      | 17534,56                                     | 6063,50  | 34,48   | 33,97                     | 7413,97   | 6884,15                                     | 32,28  | 14758,62   | 3827,97   | 28,83                     | 28,44   | 7480,22                                     | 6618,62                                      | 22,73 | 14524,57 | 3153,42 |
| 2    |              | 206,42   | 72,61   | 4866,36                   | 3903,25   | 211,01                                      | 12956,22                                     | 4775,89  | 66,48   | 64,92                     | 5187,22   | 5221,25                                     | 23,63  | 10827,64   | 4333,60   | 37,43                     | 36,73   | 5131,93                                     | 5066,68                                      | 15,75 | 10493,80 | 2450,14 |
| 3    |              | 223,25   | 41,96   | 13944,31                  | 8008,60   | 375,34                                      | 29394,48                                     | 6625,37  | 94,32   | 42,10                     | 15329,34  | 10605,32                                    | 51,22  | 26894,46   | 6625,37   | 60,25                     | 42,10   | 15329,34                                    | 10243,08                                     | 36,14 | 25234,91 | 6625,37 |
| 4    |              | 83,57  | 23,14   | 13923,04                  | 11101,12  | 382,44                                      | 32597,72                                     | 5938,64  | 32,54   | 23,14                     | 11989,66  | 14681,47                                    | 67,67  | 27881,24   | 5938,64   | 23,94                     | 21,97   | 12411,88                                    | 14170,76                                     | 47,93 | 27480,87 | 5593,86 |
| 5    |              | 97,41  | 45,16   | 8829,96                   | 13281,18  | 244,50                                      | 20312,91                                     | 6734,62  | 30,56   | 30,21                     | 7704,92   | 8757,15                                     | 38,58  | 17184,97   | 4508,90   | 22,69                     | 22,40   | 7894,87                                     | 8440,94                                      | 27,50 | 16851,09 | 3343,03 |
| 1    | Temuco       | 133,74   | 47,15   | 8017,04                   | 5172,33   | 266,55                                      | 18464,88                                     | 6366,68  | 38,99   | 38,50                     | 7490,41   | 6775,69                                     | 31,82  | 14862,43   | 5184,77   | 23,66                     | 23,40   | 7562,04                                     | 6510,15                                      | 22,31 | 14490,31 | 3128,59 |
| 2    |              | 268,75   | 62,32   | 485,69                    | 3777,12   | 262,21                                      | 13822,10                                     | 5014,68  | 68,28   | 61,96                     | 5248,42   | 5040,69                                     | 22,16  | 10704,40   | 4984,72   | 35,14                     | 34,73   | 5196,99                                     | 4886,23                                      | 15,55 | 10374,65 | 2777,41 |
| 3    |              | 290,40   | 36,68   | 13892,25                  | 7823,24   | 465,53                                      | 30764,81                                     | 6956,64  | 102,93  | 36,80                     | 15365,84  | 10340,13                                    | 51,71  | 27425,00   | 6956,64   | 61,40                     | 36,80   | 14265,72                                    | 9977,88                                      | 36,39 | 24925,50 | 6956,64 |
| 4    |              | 103,71   | 20,22   | 13905,56                  | 10858,14  | 472,29                                      | 34100,51                                     | 6235,58  | 34,18   | 20,22                     | 11989,49  | 14333,84                                    | 67,02  | 27579,19   | 6235,58   | 23,97                     | 21,02   | 12475,49                                    | 13823,13                                     | 47,37 | 27185,62 | 6235,58 |
| 5    |              | 122,14   | 39,45   | 8817,10                   | 6512,61   | 303,15                                      | 21323,30                                     | 7071,36  | 33,48   | 33,14                     | 7779,25   | 8574,04                                     | 37,76  | 17060,85   | 5945,44   | 23,97                     | 21,02   | 7973,45                                     | 8257,83                                      | 26,89 | 16735,20 | 3558,98 |
| 1    | Punta Arenas | 188,87   | 39,36   | 4227,67                   | 4353,41   | 441,04                                      | 17651,52                                     | 6685,01  | 46,45   | 39,36                     | 6173,19   | 6911,86                                     | 38,70  | 13810,24   | 6354,47   | 27,81                     | 27,38   | 5878,60                                     | 6779,01                                      | 26,83 | 13160,28 | 4401,17 |
| 2    |              | 439,00   | 52,32   | 2664,36                   | 3869,26   | 438,30                                      | 15349,10                                     | 5265,41  | 96,79   | 52,32                     | 4713,75   | 5932,94                                     | 28,04  | 11172,15   | 4548,46   | 56,91                     | 51,87   | 4433,44                                     | 5855,62                                      | 19,54 | 10655,17 | 4507,70 |
| 3    |              | 494,75   | 30,66   | 8923,30                   | 7273,05   | 760,72                                      | 31845,15                                     | 7304,47  | 171,70  | 30,76                     | 13980,16  | 11337,66                                    | 66,15  | 26557,43   | 6309,88   | 94,47                     | 30,76   | 12307,80                                    | 11156,45                                     | 46,27 | 24331,25 | 6309,88 |
| 4    |              | 152,88   | 16,86   | 6511,75                   | 9955,26   | 772,11                                      | 32343,77                                     | 6547,35  | 45,06   | 16,86                     | 9337,16   | 15558,19                                    | 83,91  | 26467,79   | 4942,37   | 29,51                     | 16,86   | 9188,04                                     | 15302,75                                     | 58,99 | 25596,27 | 4942,37 |
| 5    |              | 168,40   | 31,69   | 4254,22                   | 5798,35   | 499,01                                      | 20314,97                                     | 7424,92  | 36,58   | 31,69                     | 6189,91   | 9109,71                                     | 45,66  | 16150,66   | 12827,86  | 22,47                     | 22,07   | 5981,51                                     | 8951,52                                      | 32,27 | 15537,72 | 4470,61 |

Los gráficos 1, 2 y 3 describen la demanda energética, generación solar y costo de ciclo de vida promedio en un periodo de 20 años para los cinco casos de estudio ubicados en Calama, Santiago y Punta Arenas, con calidad constructiva MEJORADA. Por ciudad se evidencia que la demanda energética y generación solar es variable en los casos 2 y 3 debido a las características volumétricas de cada establecimiento; pero con mayor costo de ciclo de vida en los casos 3 y 4, edificaciones con mayor superficie construida. También se evidencia que volumetrías más compactas demandan menor energía en latitudes australes pero tienen menores posibilidades de generación solar, a diferencia de latitudes norte donde la generación solar equipara la demanda energética.

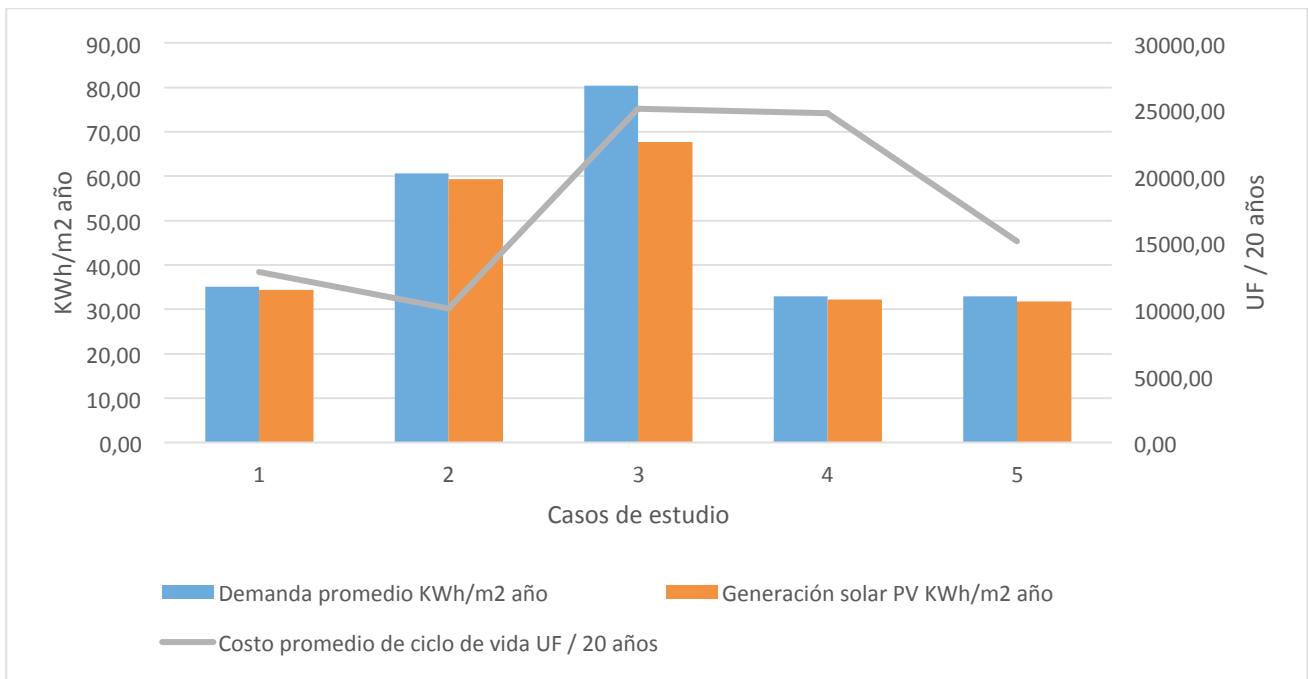


Gráfico 1. Demanda energética vs generación y costo de ciclo de vida. Caso 1 / Calama / TDRé MEJORADO. Elaboración propia.

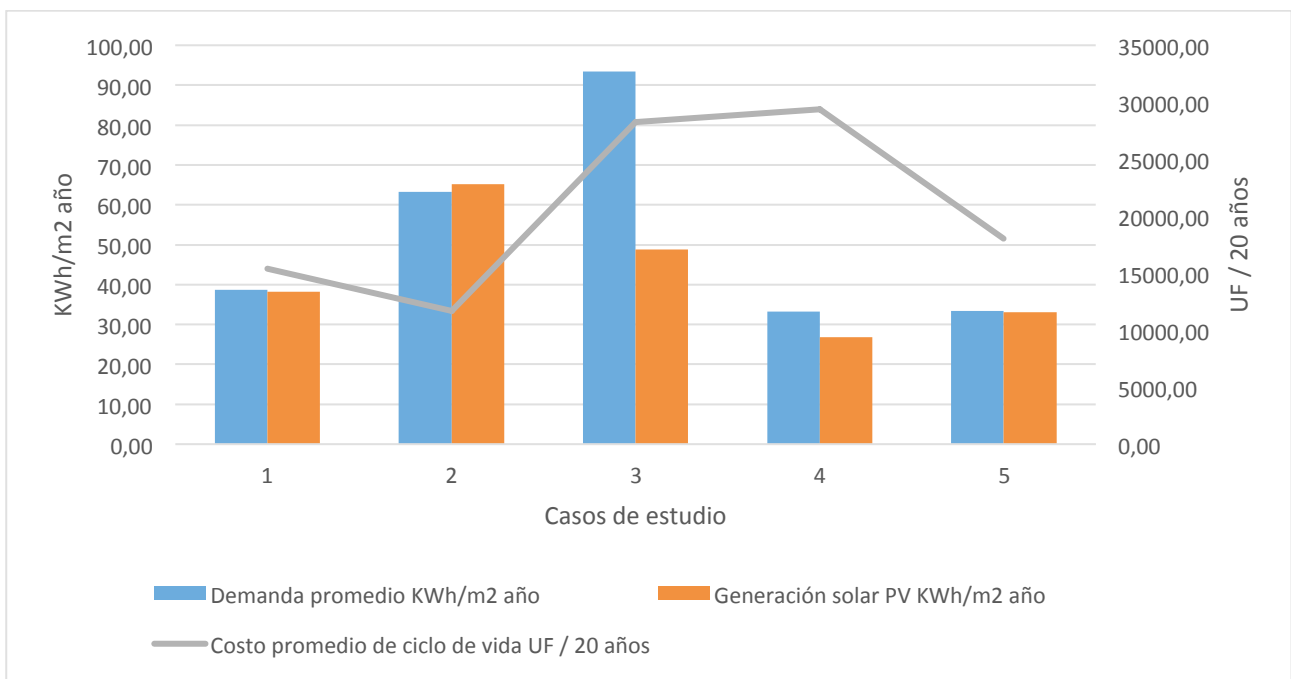


Gráfico 2. Demanda energética vs generación y costo de ciclo de vida. Caso 1 / Santiago / TDRé MEJORADO. Elaboración propia.

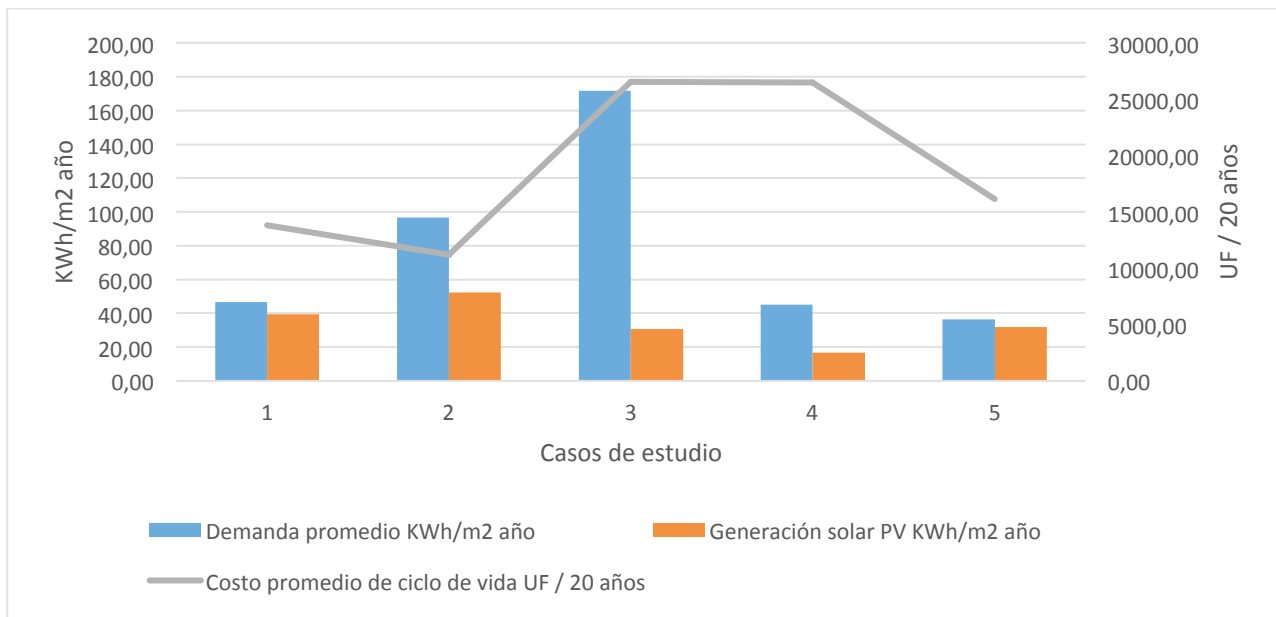


Gráfico 3. Demanda energética vs generación y costo de ciclo de vida. Caso 1 / Punta Arenas / TDRé MEJORADO. Elaboración propia.

## Discusión y Conclusiones

La infraestructura del sistema de atención primaria en Chile, presenta una estructura diversificada de establecimientos que busca prevenir las enfermedades brindando servicios integrales a la familia y la comunidad. Dentro de este sistema se reconoce la importancia de los centros de salud familiar (CESFAM), que durante las dos últimas décadas han conservado un plan de construcción organizado y constante. De acuerdo al registro y análisis realizado se advierte que estos establecimientos presentan una conformación programática y funcional similar pero tipológicamente diversa a lo largo y ancho del territorio, con magnitudes de 1.000 a 3.500 m<sup>2</sup>. Variando de tamaño según población atendida, geometría del lote y organización de recintos, produciendo edificaciones de uno, dos o tres niveles, con presencia de patios internos para asegurar iluminación y ventilación natural, lo que arroja como resultado volumetrías relativamente compactas alargadas, rectangulares, cuadradas y en ocasiones, curvas, carentes de contextualización cultural y ambiental.

El análisis paramétrico a través de simulaciones de desempeño y evaluación de costo social para centros de salud primaria cero-energía en Chile, basado en casos seleccionados y diversas alternativas, permite establecer mejoramientos específicos y criterios generales. Determinando, en esta tipología que la adopción de envolventes más aisladas y selladas presenta una reducción progresiva de los requerimientos ambientales en todos los ejemplos y situaciones climáticas, expresando una relevante contribución a la calidad ambiental de los establecimientos. Se advierte también un considerable aumento de demandas en los climas más australes en los distintos casos, reducidos proporcionalmente con los tratamientos constructivos, por lo que las inversiones en estrategias de eficiencia energética y generación solar en establecimientos para estas latitudes australes son significativamente más rentables y con mayor repercusión social.

Estos resultados sugieren que la estrategia constructiva de centros de atención primaria en salud en Chile, ha permitido desarrollar una implementación progresiva, pero desatendiendo diferencias geográficas. A la vez que demuestran la alta justificación de las adecuaciones térmicas en establecimientos de localizaciones más australes. La revisión efectuada permite entonces plantear que los programas de edificación pública, especialmente en países como Chile con gran diversidad geográfica, deben considerar distinciones del entorno climático para orientar más cabalmente sus recursos en el fin de otorgar prestaciones con adecuada calidad ambiental a toda la población.

## Agradecimientos

Este trabajo forma parte de tesis en el Doctorado en Arquitectura y Urbanismo de la U. del Bío-Bío, con apoyo del Proyecto FONDECYT 1171108, Servicio de Salud Concepción y Talcahuano

## Referencias

- Araujo, R. (2010). Diseño y construcción del Hospital Infanta Leonor en Vallecas (Madrid). *Informes de la Construcción*, 62(520), 19. <http://doi.org/10.3989/ic.10.030>
- Bonnema, E., Doebber, I., Pless, S., & Torcellini, P. (2010). *Technical Support Document: Development of the Advanced Energy Design Guide for Small Hospitals and Healthcare Facilities--30% Guide*. (National Renewable Energy Laboratory, Org.). Colorado. Recuperado de <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/46314.pdf>
- Claudio Canales Cifuentes. (2008). Arquitectura Hospitalaria Hospitales de Niños en Santiago. *DU&P DISEÑO URBANO Y PAISAJE*, 13, 22.
- Eric Bonnema, Shanti Pless, I. D. (2010). Advanced Energy Design Guide for Small Hospitals and Healthcare Facilities. *ASHRAE Design Guide*, 1(2), 277–296. <http://doi.org/10.1260/2040-2295.1.2.277>
- García Sanz. (2014). *Diseño de centros sanitarios eficientes*. (A. E. de la Energía, Org.). Madrid. Recuperado de <http://www.agenex.net/guias-altercexa>
- Guerras, J. J. S. (2003). Verticalidad versus horizontalidad. Historia de la construcción de hospitales en el siglo xx. *Informes de la Construcción*, 55(Figura 1), 13. <http://doi.org/https://doi.org/10.3989/ic.2003.v55.i485.559>
- Halverson, M, M. R. ANSI / ASHRAE / IES Standard 90.1-2013. Determination of Energy Savings : Quantitative Analysis (2014). Washington, D.C. Recuperado de [https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-23479.pdf](https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-23479.pdf)
- Ministerio de Energía. (2016). *Energía-2050, Política Energética de Chile*. (M. de Energía, Org.). Santiago de Chile.



# SIMULACIÓN ENERGÉTICA PARAMÉTRICA. ANÁLISIS DE PARÁMETROS INFLUYENTES EN LAS CARGAS ENERGÉTICAS

## Parametric energy simulation. Analysis of influential parameters in energy charges

**M. Victoria Mercado** (Autor principal / Autor de Contacto)

Filiación: Instituto de Ambiente Hábitat y Energía. INAHE, CCT Mza-CONICET

Dirección: Av. Ruiz Leal s/n°, Parque Gral San Martín. Ciudad de Mendoza, Mendoza, Argentina CP: 5500.

Correo: mvmercado@mendoza-conicet.gob.ar

**Gustavo Barea Paci**

Filiación: Instituto de Ambiente Hábitat y Energía. INAHE, CCT Mza-CONICET

Dirección: Av. Ruiz Leal s/n°, Parque Gral San Martín. Ciudad de Mendoza, Mendoza, Argentina CP: 5500.

Correo: gbarea@mendoza-conicet.gob.ar

**Alfredo Esteves**

Filiación: Instituto de Ambiente Hábitat y Energía. INAHE, CCT Mza-CONICET

Dirección: Av. Ruiz Leal s/n°, Parque Gral San Martín. Ciudad de Mendoza, Mendoza, Argentina CP: 5500.

Correo: aesteves@mendoza-conicet.gob.ar

**Manuscript Code:** 007

**Date of Acceptance/Reception:** 27-09-2018/24-08-2018

### Resumen

Se han realizado numerosos estudios de la incidencia de diferentes variables de diseño bioclimático como la forma, la orientación, la calidad térmica de la envolvente, el nivel de aislación, entre otros, a partir de los cuales se han obtenido datos de la influencia de estos en el consumo energético. Sin embargo son pocos los estudios que apuntan a la relación entre ellos. Con el avance de las herramientas de simulación es posible evaluar estas variables combinadas entre sí, con la metodología paramétrica. El principal objetivo del trabajo es Evaluar la mejor combinación entre (forma, orientación y envolvente) para minimizar el consumo energético y ponderar la importancia de las variables estudiadas en el diseño del edificio. La metodología utilizada fue la simulación paramétrica realizada en tres etapas, 1. Establecer rangos de cada variable para el estudio paramétrico, 2. Seleccionar los periodos de simulación adecuados en base los archivos climáticos y, 3. Evaluar los resultados para obtener variables de sensibilidad de cada variable en estudio. A partir de los resultados obtenidos se realizó un estudio de sensibilidad de la influencia en el consumo energético de cada variable. Fue posible advertir la preponderancia de las mismas obtenida por el análisis de sensibilidad. Para la forma cuadrada: Orientación-Utecho-Umuros-WWR; para la forma rectangular: Orientación Utecho-WWR-Umuro y para la forma L: Orientación-Utecho-WWR-Umuro.

**Palabras claves:** Eficiencia energética, Simulación energética edilicia, Simulación paramétrica

### Abstract

Several studies have been conducted on the incidence of different bioclimatic design variables such as shape, thermal orientation, thermal quality of the envelope, level of insulation, among others, from which data have been obtained of the influence of these on energy consumption. However, few studies point to the relationship between them. With the advance of the simulation tools it is possible to evaluate these variables combined with each other, with the parametric methodology. The main objective of the work is to evaluate the best combination between (form, orientation and envelope) to minimize energy consumption and to weigh the importance of the variables studied in the design of the building. The methodology used was the parametric simulation carried out in three stages, 1. Select the simulation periods based on the climatic archives and, 3. Evaluate the results to obtain the sensitivity variables of each variable under study. Based on the results obtained, a sensitivity study of the influence on the energy consumption of each variable was carried out. It was possible to notice the preponderance of the same results by the sensitivity analysis. For the square shape: Orientation-Utecho-Umuros-WWR; for the rectangular shape: Orientation Utecho-WWR-Umuro and for the L shape: Orientation-Utecho-WWR-Umuro.

**Keywords:** Energy efficiency, Building energy simulation, Parametric simulation

## Introducción y Estado del arte del problema

Dado que los edificios son responsables de alrededor del 32% del gasto de la energía total (<https://www.iea.org/etp2017/>), se han desarrollado muchas iniciativas y políticas para construir edificios más eficientes. En la Unión Europea, todos los edificios nuevos deben ser construidos con "energía casi nula" antes del 31 de diciembre de 2020 (CE de la Unión Europea, 2012). Por ello las variables que influyen en el consumo energético de los edificios se están convirtiendo en una prioridad clave para la toma de decisiones a la hora del diseño.

Según Olgyay, en las premisas de diseño bioclimático debe existir un proceso de análisis del ambiente, del clima, la biología humana, el equilibrio armónico de la obra, de los principios físicos y las técnicas para poder responder a la consigna de bienestar y confort de los habitantes. (Olgyay, 1998).



Por lo tanto en las primeras etapas del diseño se deben contemplar una serie de medidas que tienen una gran influencia en el rendimiento del edificio. La forma, la orientación, la materialidad de la envolvente, la ocupación y el clima son algunas de las variables a tener en cuenta en la etapa inicial.

Estas decisiones de diseño, deben definirse en etapas tempranas, donde las herramientas de simulación de performance de edificios (BPS) no son útiles, ya que aún no se ha esbozado un proyecto arquitectónico terminado. Estas herramientas, rara vez, se utilizan en la etapa inicial del proyecto como método de evaluación debido a que el nivel de información es bajo y los cambios de diseño son variados. (Depecker, Menezes, Virgone & Lepers, 2011; Stevanović, 2013; Hoseini et al., 2013; Kristoffer et al., 2015).

Para ello es indispensable estudiar cómo se comportan las diferentes decisiones de proyecto con relación a la eficiencia energética de los edificios. Es por ello que una de las formas es realizar, mediante múltiples simulaciones, un análisis de sensibilidad de cada una de las variables.

Los métodos de análisis de sensibilidad para edificios, se aplican para estudiar la respuesta de un modelo a la variación de los datos de entrada (variables) con el fin de identificar el impacto en el consumo energético. Proporciona información valiosa sobre el modelo, como la comprensión de lo que está influyendo en los niveles los parámetros elegidos para su análisis y sus interacciones. Los métodos de análisis de sensibilidad tienen como objetivo identificar los parámetros más influyentes en el consumo energético, en este caso.

Saltelli clasificó diferentes enfoques de análisis de sensibilidad (Saltelli, 2010):

Método local: donde un parámetro varía a la vez, mientras uno se establece fijo.

Método global: se usa para cuantificar la influencia de los parámetros en todo su rango de variación, y determinar su impacto en el resultado, ordenándolos por su nivel de importancia.

Método de detección: donde se busca cubrir todo el espacio de entrada para determinar las variables más influyentes cualitativamente.

Para este estudio se ha utilizado el método local y los objetivos del trabajo son a. Evaluar la mejor combinación entre (forma, orientación y envolvente) para minimizar el consumo energético y ponderar la importancia de las variables estudiadas en el diseño de un edificio bioclimático y, b. Jerarquizar cada variable en relación a la forma para efectivizar el desempeño energético del edificio.

Se han realizado diversos estudios de la incidencia de las variables mencionadas como la forma, la orientación, la calidad térmica de la envolvente, la relación entre envolvente translúcida y opaca entre otros, a partir de los cuales se han obtenido datos de la influencia de estos en el consumo energético (Gasparella et al., 2011; Hachem, Athienitis & Fazio, 2011; Hachem, Athienitis & Fazio, 2012; Loonen, Trčka, Cóstola & Hensen, 2013; Tuhus-Dubrow & Krarti, 2010). Sin embargo son pocos los estudios que apuntan a las relaciones entre ellas. Con el avance de las herramientas de simulación es posible evaluar estas variables combinadas entre sí, por medio de la metodología paramétrica. De esta manera es posible obtener la influencia que tienen sobre el desempeño energético edificio en relación a la forma.

En el presente estudio se aborda el análisis de las siguientes variables: la forma, la orientación, la calidad térmica de la envolvente y la relación de envolvente (opaca y translúcida) para la situación de una vivienda de índole social. Se establece una única variable constante, la superficie en 80m<sup>2</sup>. El estudio de estas variables se realizó en un clima Templado frío de la Argentina sumando un total de 768 simulaciones.

## Metodología

EL avance en programas de simulación computacional permite la evaluación simultánea de numerosas variables y la interrelación entre ellas, que anteriormente suponían trabajos extensos y difíciles de realizar. La metodología paramétrica es un método exhaustivo que otorga la posibilidad de crear pautas de diseño bioclimático considerando varias estrategias a la vez. Samuelson et al., afirman que *las simulaciones tradicionalmente utilizadas en la industria de la construcción requieren entradas detalladas y, por lo tanto, son difíciles de emplear en las primeras etapas de diseño cuando el ritmo de la iteración de diseño es rápido y las entradas de simulación incluyen muchas variables desconocidas* (Samuelson et al., 2016).

El estudio se realizó con el software Energy Plus (version 8.9.0, 2018), por tratarse de una herramienta de simulación que permite un proceso cíclico y continuo con el proceso de diseño. Este programa ha sido desarrollado por el Departamento de Energía de EE.UU.

La metodología se estableció en 3 etapas:

1. Constituir rangos de cada variable para el estudio paramétrico,
2. Seleccionar de termostatos y localización climática,
3. Evaluar los resultados para obtener variables de sensibilidad y las diferentes ponderancias de cada variable.

### 1. Rangos de cada variable para el estudio paramétrico

**Forma:** Se consideraron tres formas diferentes que cubrieran la misma superficie de piso,  $80m^2$ . Las formas presentan diferentes tipos de resolución, llenando desde una tipología compacta a una tipología abierta. Como tipología compacta se opta por un edificio cuadrado, donde la relación ancho-largo es 1 a 1, una composición rectangular con una relación de 1 a 2, y la tipología abierta en forma de L con una relación de 1 a b por tratarse de una respuesta frecuentemente utilizada como respuesta a lotes con predominancia rectangular.

**Relación vidrio-envolvente opaca (WWR%):** 20%-40%-60%-80%. El porcentaje de vidrio sobre envolvente opaca se distribuye de forma equivalente en todas las fachadas.








**Orientación:** Se rota el edificio en  $0^\circ$ - $45^\circ$ - $90^\circ$ - $135^\circ$ , con relación al Norte en sentido horario.

**Calidad térmica de la envolvente:** Para el análisis de la calidad térmica de la envolvente, se toma como referencia la norma IRAM 11605 de Argentina, "Acondicionamiento térmico. Condiciones de habitabilidad en Viviendas". Esta norma establece diferentes niveles de transmitancia que corresponden a un grado decreciente de calidad térmica, siendo: Nivel A: Recomendado, Nivel B: Medio y Nivel C: Mínimo. Para este punto se considera el sistema de construcción tradicional y másico, siendo para muros: ladrillo cerámico masiso, revoque en ambos lados y aislación; y para techos: Losa de hormigón alivianada, mortero para pendiente, membrana asfáltica y aislación. Para poder obtener la variabilidad de los paquetes constructivos de acuerdo a los valores de transmitancia requeridos por la norma se modifica los espesores de aislación térmica, considerando para el estudio la utilización de poliestireno expandido.

En un trabajo de los autores (Mercado & Esteves, 2005), se advirtió la necesidad de incorporar un nivel intermedio entre el nivel A y el nivel B, dado que el primero requiere la incorporación de aislación térmica en espesores importantes e injustificados desde el punto de vista térmico, práctico y económico. Este nivel propuesto también se tiene en cuenta.

En la tabla 1, se presentan las variables utilizadas para el presente estudio.

Tabla 1. Variables consideradas para las simulaciones paramétricas.

| FORMA   |   |   | ORIENTACIÓN   |   |   |   | U TECHOS<br>(IRAM 11605 + Nivel propuesto)<br>[W/°K m <sup>2</sup> ] |         |         |        | U MUROS<br>(IRAM 11605 + Nivel propuesto)<br>[W/°K m <sup>2</sup> ] |         |         |        | WWR |     |     |     |
|---|---|---|---|---|---|---|--|---------|---------|--------|---|---------|---------|--------|-----|-----|-----|-----|
|   |   |   | 0°  | 45°   | 90°   | 135°  | Nivel A  | Nivel B | Nivel C | Recom. | Nivel A   | Nivel B | Nivel C | Recom. |     |     |     |     |
|  |  |  |  |  |  |  |  |         |         |        |   |         |         |        |     |     |     |     |
| Superficie Expuesta [m <sup>2</sup> ]   |   |   |   |   |   |   | 0.36   | 0.99    | 1.75    | 0.68   | 0.31  | 0.80    | 1.00    | 0.56   | 20% | 40% | 60% | 80% |
| 173.08  | 177.24  | 187.69  |   |   |   |   |  |         |         |        |   |         |         |        |     |     |     |     |

### 2. Termostato y zona climática

Dado que el objetivo principal del trabajo es el análisis del consumo energético de edificios, se considera propicio trabajar con el archivo climático anual. Además con el propósito de acceder a los valores de requerimiento energético para calefacción y para refrigeración se establecieron termostatos relacionados a los parámetros de confort de Olgay. Para invierno se fijó en  $20^\circ C$  y para verano  $24^\circ C$ .

### 3. Sensibilidad cada variable.

El análisis de sensibilidad permite examinar cómo el cambio en una variable afecta al resultado. En este trabajo la evaluación del requerimiento energético será sensible a las variaciones de los parámetros.

En el diseño arquitectónico la "Forma", responde a limitaciones proyectuales y contextuales inmediatas donde se implantará el hecho constructivo, por lo tanto, a esta variable se la denomina como una variable independiente (tres

casos de forma: cuadrada, rectangular y en L). Los demás parámetros (Orientación, WWR y U) serán variables dependientes (ver tabla 1).

Se utilizó la siguiente expresión para el cálculo:

$$Sensibilidad = \frac{X_{peor} - X_{mejor}}{X_{peor}} * 100\% \tag{1}$$

Con dichos resultados, se realizó el análisis de requerimiento energético total (RE) y luego desglosado en relación a la demanda de calefacción y de refrigeración.

Por último se presentan los casos de mayor y menor consumo (desempeño energético) de las diferentes combinaciones paramétricas simuladas (768 casos simulados).

## Resultados

Como se presentó en la metodología se realizó el análisis de sensibilidad para cada forma de estudio, los resultados se presentan en la Figura 1. De esta figura es posible advertir que la orientación marca una importancia relevante para cualquier tipo de forma que se utilice en la resolución edilicia, siendo la que presenta mayor porcentaje de influencia en el requerimiento energético. Sin embargo, la relación de participación de las demás variables es diferente en las distintas formas.

Para la forma cuadrada, la toma de decisiones es gobernada por la orientación, seguida de la definición de transmitancia del techo, muro y por último la cantidad de abertura que tenga el edificio por fachada. Esto se considera razonable al considerar que existe una misma cantidad en m<sup>2</sup> de aberturas por fachada en un edificio con iguales dimensiones de fachadas.

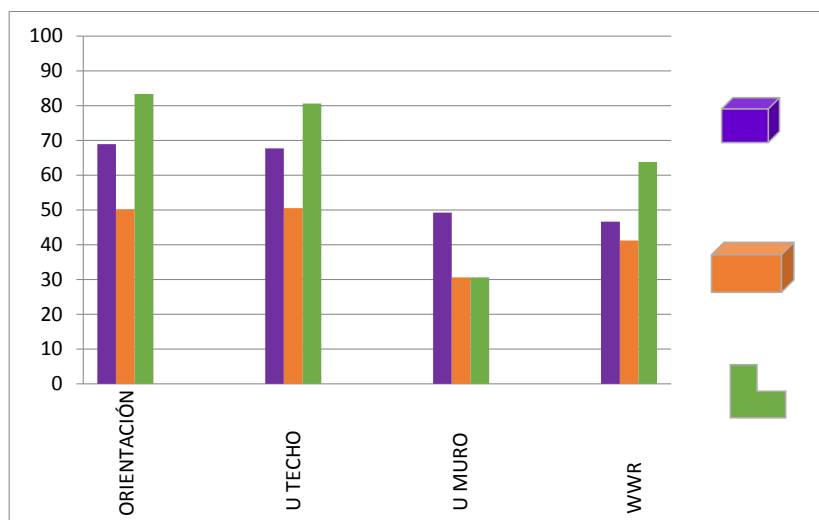


Figura 1. Análisis de Sensibilidad de las variables de estudio para cada tipología formal. Fuente: elaboración propia.

En la misma figura, se advierte también, que las decisiones de la resolución material de techos sostienen un grado de predominio similar para todas las formas. Por lo tanto esto indicaría que la orientación y el UTechos son las primeras variables que se deben atender en la resolución proyectual.

En las dos variables restantes (materialidad de muro-UMuro- y cantidad de vidrio sobre las fachadas –WWR-) se presenta una diferencia en la tendencia de sensibilidad, la forma cuadrada muestra más relevante el UMuro sobre el WWR, mientras que, las formas rectangular y en L, se invierte su predominio. El impacto de variabilidad frente al cambio de los valores de estas se modifica cuando la resolución formal comienza a perder compacidad.

Se continúa el estudio con el análisis del (RE) para cada forma. En la figura 2 se presenta un diagrama de caja para el RE total. Posteriormente, en la figura 3, se discrimina el requerimiento energético para calefacción (REc) y el requerimiento energético para refrigeración (REr).

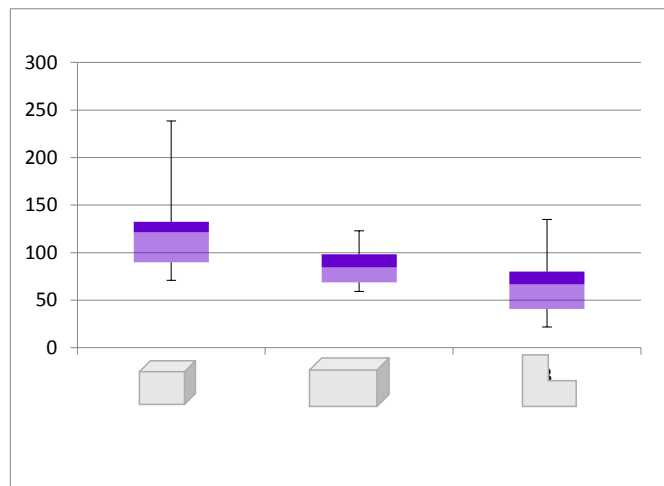


Figura 2. Diagrama de caja del requerimiento energético según la forma.

En la figura 2 es posible apreciar la diferencia de rangos del RE para las distintas formas edilicias. Si bien el rango es sustancialmente menor para la forma prismática rectangular, se advierte que la media y los cuartiles 2 y 3 son menores en la forma L, lo que supone un mejor comportamiento energético de este último. Sin embargo, al igual que el rango para la forma prismática cuadrada, la dispersión de los datos evidencia que las variables de orientación, UTecho, UMuro y WWR, poseen mayor incidencia en el mejor o peor desempeño energético del edificio.

Por el contrario para la forma rectangular las variables de diseño contempladas en el presente estudio, pueden hacer oscilar el RE hasta 43% menos que la variación que pueden significar para la forma cuadrada.

De este tipo de diagramas es posible advertir la dispersión de los datos máximos y mínimos del RE. En la forma cuadrada los valores de RE mayores se encuentran en una franja de disgregación mayor que para el caso de la forma rectangular, mientras que para los RE mínimos se encuentran concentrados en un rango menor para todas las formas. Esto supone que los valores o acciones que propician una mejora en el consumo energético se encuentran acotadas a un grupo reducido que se podrá observar detectando los mejores casos para cada forma (Tabla 3).

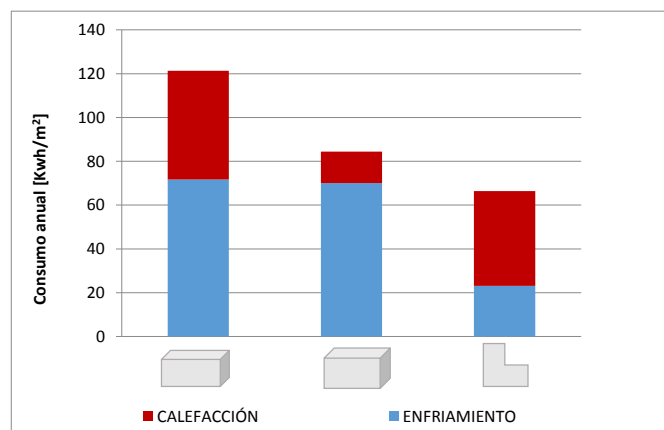





Figure 3. Requerimiento energético para calefacción y para refrigeración.

La figura 3 muestra la diferencia entre el REc y el REr para cada forma en kWh/m<sup>2</sup>. El mayor consumo para ambas situaciones se presenta para la forma cuadrada, para las otras dos formas la diferencia entre los consumos de cada requerimiento es sustancial. Mientras que la forma rectangular presenta una disminución significativa del Rec en relación a la forma cuadrada, el Rer es similar, lo que implica una mayor exposición de las fachadas a la incidencia de la radiación solar. En cambio, en la forma en L, el REr es hasta un 60% menor que para la forma cuadrada lo que supone que las aberturas se encuentran más protegidas. Así mismo se evidencia una falta de esta en la época de calefacción lo que eleva el Rec a niveles semejantes a la forma cuadrada.

En la Tabla 3, se muestran los casos con mejor y peor desempeño energético total, de calefacción y de refrigeración del análisis de los 768 casos de interrelaciones entre las variables analizadas.

**Tabla 2.** Casos de mejor y peor combinación para calefacción y enfriamiento por forma.

|                     |  |  |  |
|---------------------|---|---|---|
| <b>ENFRIAMIENTO</b> | <b>Caso</b>   | <b>Caso</b>   | <b>Caso</b>   |
| mejor               | $\theta: 45^\circ; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 20\%$                                 | $\theta: 0^\circ; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 40\%$                                  | $\theta: 0^\circ; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 20$                                      |
| peor                | $\theta: 135^\circ; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 40\%$                                | $\theta: 135^\circ; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 80\%$                                | $\theta: 45^\circ; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 80$                                     |
| <b>CALEFACCIÓN</b>  | <b>Caso</b>   | <b>Caso</b>   | <b>Caso</b>   |
| mejor               | $\theta: 0^\circ; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 40\%$                                  | $\theta: 0^\circ; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 20\%$                                  | $\theta: 0^\circ/90^\circ; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 20$                             |
| peor                | $\theta: 135^\circ; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 20\%$                                | $\theta: 90^\circ; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 80\%$                                 | $\theta: 45^\circ; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 80$                                     |
| <b>TOTAL</b>        | <b>Caso</b>   | <b>Caso</b>   | <b>Caso</b>   |
| mejor               | $\theta: 0^\circ; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 60\%$                                  | $\theta: 0^\circ; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 20$                                    | $\theta: 0^\circ/90^\circ; UT: 0.36; UM: 0.31; WWR: 20$                             |
| peor                | $\theta: 135^\circ; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 40\%$                                | $\theta: 90^\circ; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 80$                                   | $\theta: 45^\circ; UT: 1.75; UM: 1.00; WWR: 80$                                     |
|                     | <b>KWh/m<sup>2</sup></b>  | <b>KWh/m<sup>2</sup></b>  | <b>KWh/m<sup>2</sup></b>  |
|                     | 0.0   | 59.3  | 59.3  |
|                     | 160.4   | 87.7  | 87.7  |
|                     | 0.1   | 0.0   | 21.7  |
|                     | 160.5   | 35.9  | 74.5  |
|                     | 70.8  | 59.3  | 21.7  |
|                     | 238.4   | 122.9   | 135.0   |

Los casos de mejor desempeño en calefacción y en refrigeración no son los mismos debido que si bien una conjunción de variables posibilita el consumo 0 para una estación, ese mismo requerirá consumo energético en la estación opuesta.

El coeficiente de transmitancia (U) en techos y muros, se observa como un factor común. Los niveles de menor consumo responden al coeficiente U dado para el Nivel A de la Norma IRAM 11605. Para un RE alto se advierte que la propiedad U de techos y muros se sitúa en un rango alto que supone la falta de aislación térmica en los paquetes constructivos. Se denomina factor común debido a que para los casos de calefacción, enfriamiento y el análisis total el resultado es el mismo.

Se considera importante advertir que existe un rango de diferencia de 3 y 8% entre los casos de mejor desempeño optando por el nivel A y el nivel recomendado para la transmitancia de techos y muros. Esto supone que por una reducción de la inversión de hasta el 50% en aislar techos y muros es factible obtener rendimientos energéticos muy similares a los mostrados en este trabajo como los mejores. Esto ya se preveía en un trabajo anterior (Mercado y Esteves, 2005).

El WWR y la orientación varían sustancialmente entre los casos de formas y para los REc y REr.

Para la variable de WWR, las formas menos compactas, rectangular y L, presentan una marcada diferencia entre los casos de mejor y peor desempeño para ambas situaciones (calefacción y enfriamiento). Para la condición de enfriamiento, se enfatiza la necesidad de reducir las aberturas por fachada, el 85% de los casos presenta el mejor desempeño con un WWR= 20%, mientras que el 15% admite hasta un WWR=40%. En los casos de peor desempeño energético para todos los escenarios (enfriamiento, calefacción y total), la relación WWR es del 80%.

La forma cuadrada presenta un comportamiento particular, se advierte que es inverso para el REc en relación al REr. Sin embargo cuando se considera el RE total se prioriza un alto porcentaje como mejor desempeño siendo el WWR= 60%.

En relación a la orientación, los patrones mejores y peores son similares entre formas. Como se asumía de acuerdo a la bibliografía consultada, las formas en general poseen mal comportamiento energético cuando sus caras no se orientan francamente al norte. Esto se considera como consecuencia de un ingreso de la ganancia solar directa. En la forma cuadrada esto se produce cuando se gira en ángulos de 45° y 135°, por la reducción de la cantidad de superficie transparente expuesta de forma directa a la radiación solar. Para la forma rectangular, la situación es similar cuando la forma gira y queda su lado menor. Al igual que las otras formas, la forma L muestra la disposición del mejor o peor caso en relación a su orientación, cuando la forma gira y sus fachadas poseen menos exposición solar, el ER sube; por el contrario cuando las fachadas se orientan de forma franca al Norte (por tratarse del Hemisferio Sur) el ER es menor.

## Discusión y Conclusiones

El estudio realizado asevera la importancia de las primeras decisiones adoptadas en el proyecto de arquitectura en relación al requerimiento energético del mismo.

El estudio de sensibilidad, utilizando como variable independiente la forma, arrojó datos de importancia para la toma de decisiones del proyectista, pudiendo proporcionar un mapa de referencia de cuáles son las decisiones que se deben considerar en el comienzo de un proyecto arquitectónico.

Este análisis demostró que cuando la forma es algo ya determinado, la variable más influyente en el consumo energético del edificio es la orientación. Cuando se trabaja sobre un edificio donde las dimensiones de las fachadas son similares esta es menor, sin embargo cuando el edificio comienza a variar sustantivamente las dimensiones de sus fachadas este parámetro cobra mayor relevancia.

En relación a la composición de su envolvente traducido al coeficiente de transmitancia  $U$ , la relación es directa, a menor  $U$  en techos y muros, menor es el requerimiento energético (ER) para todas las formas. Se observó también, que la relación de consumo entre los niveles de transmitancia propuestos por el Nivel A de la Norma IRAM 11605 y el nivel recomendado alcanza una diferencia mínima del ER, siendo de hasta el 8% menor con un costo de aplicación del 50%.

La relación de fachada transparente y opaca (WWR) en el análisis de sensibilidad resulta ser el de menor influencia. Sin embargo se considera importante destacar que el uso excesivo de la abertura como recurso arquitectónico derivará directamente en un mayor consumo energético. Para formas más compactas el tratamiento de superficies transparentes permite elevar por encima del 20% el porcentaje de abertura sobre muros, pero para formas más abiertas este valor se reduce al 20% considerándolo óptimo. Respondiendo al objetivo dos de este trabajo, se considera que la jerarquización de las variables debe responder a la preponderancia de las mismas obtenida por el análisis de sensibilidad. Para la forma cuadrada: Orientación-Utecho-Umuros-WWR; para la forma rectangular: Orientación Utecho-WWR-Umuro y para la forma L: Orientación-Utecho-WWR-Umuro. Entonces la variable preponderante será la orientación, mientras que el coeficiente  $U$  y la relación WWR variará de acuerdo a la forma. Por último se considera continuar con el trabajo en otras zonas bioambientales de la República Argentina y de esta manera se completará el estudio para climas: Cálido, Templado Cálido y Frío.

## Referencias

- Agencia Internacional de Energía (AIE). (2012). World Energy Outlook. Paris, Agencia Internacional de Energía (AIE).
- AmirHosein, G., Nur, D. D., Umberto, B., Ali, G., Nastaran & M., Mahdiar, G. (2013). Sustainable energy performances of green buildings: A review of current theories, implementations and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 1-17. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.010>.
- Andrea, G., Giovanni, P., Francesca, C., Piercarlo, R. & Paolo, B. (2011). Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well insulated residential building. *Energy and Buildings*, 43, 1030-1037. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.032>.
- Attia, S., Gratia, E., De Herde, A. & Hensen, J. L. M. (2012). Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and Buildings*, 49, 2-15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.028>.
- CE de la Unión Europea (2012). Directrices que acompañan a la regulación delegada de la Comisión (UE), no. 244/2012. *J. Eur. Comm.* [En línea]. Disponible en [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52012XC0419\(02\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52012XC0419(02))
- Depecker, P., Menezes, C., Virgone, J. & Lepers, S. (2011). Design of buildings shape and energetic consumption. *Building and Environment*, 46, 627-635. ISSN 0360-1323, [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00044-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00044-5).
- Hachem, C., Athienitis, A. & Fazio, P. (2011). Parametric investigation of geometric form effects on solar potential of housing units. *Solar Energy*, 85, 1864-1877. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.027>.
- Hachem, C., Athienitis, A. & Fazio, P. (2012). Evaluation of energy supply and demand in solar neighborhood. *Energy and Buildings*, 49, 335-347. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.021>.
- Loonen, R. C. G. M., Trčka, M., Cóstola, D. & Hensen, J. L. M. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 483-493. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>.
- Negendahl, K. & Nielsen, T. R. (2015). Building energy optimization in the early design stages: A simplified method. *Energy and Buildings*, 105, 88-99. ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.087>.
- Nembrini, J., Samberger, S. & Labelle, G. (2014). Parametric scripting for early design performance simulation. *Energy and Buildings*, 68, 786-798. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.044>.
- Olgay, V. (1998). *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona, Gustavo Gili.
- Saltelli, A. & Chan, K. (2010). *Sensitivity analysis*. In *Wiley Series in Probability and Statistics* (2nd edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Samuelson, H., Clausnitzer, S., Goyal, A., Chen, Y. & Romo-Castillo, A. (2016). Parametric energy simulation in early design: High-rise residential buildings in urban contexts. *Building and Environment*, 101, 19-31. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.018>.
- Stevanović, S. (2013). Optimization of passive solar design strategies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 177-196. ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.028>.
- Tuhus-Dubrow, D. & Krarti, M. (2010). Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment*, 45, 1574-1581. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.005>.



# Las implicancias para simulaciones de energía de la certificación GBC Zero Energy [Zero Energy Buildings]

## The implications for energy simulations of GBC Zero Energy Certification [Zero Energy Buildings]

**Pablo Antonio Hidalgo Sandoval** (Autor principal / Autor de Contacto)

Filiación: Universidade Presbiteriana Mackenzie

Dirección: R. Itambé, 143 - Higienópolis, São Paulo - SP, 01302-907

Correo: pablo@phsee.com

**Manuscript Code:** 008

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

### Resumen

Este ensayo describe la propuesta para obtener una referencia al proceso de modelado de energía en la certificación brasileña "GBC Brasil Zero Energy" para edificios con cero energía neta. La certificación carece de una norma que establezca los pasos necesarios para lograr edificios de alto rendimiento, ya que solo presenta créditos y formularios que pueden cumplirse, en algunos casos, sin una evaluación de modelado de energía. Como metodología, se presenta la utilización del estándar ASHRAE 209-2018 que indica un procedimiento lógico y secuencial para evaluar, calibrar y rastrear el consumo de energía durante todo el proceso de diseño del edificio. Las técnicas del software DesignBuilder son indicadas como pasos necesarios para evaluar un edificio en cuanto a rendimiento energético. Los resultados esperados son la mejora de la calidad y la confiabilidad del diseño energético a lo largo del tiempo y de todos los problemas ambientales involucrados, como la reducción de emisiones de carbono y la energía renovable utilizada. El impacto que la utilización del estándar ASHRAE 209-2018 tendría al ser aplicado en edificios que buscan ser cero energía, provocaría un cambio de paradigma tanto en el proceso de diseño, como en la operación y el funcionamiento de los edificios. El área de simulaciones de energía se vería inmensamente favorecida porque se aprovecharían de la mejor manera las herramientas de análisis de los softwares.

**Palabras claves:** GBC Brasil zero energy, ASHRAE 209-2018, Edificios cero energía neta, DesignBuilder, Modelado de energía de edificios.

### Abstract

This essay describes the proposal to obtain a reference to the energy modeling process in the Brazilian certification "GBC Brasil Zero Energy" for buildings with zero net energy. The certification lacks a standard that establishes the necessary steps to achieve high performance buildings, since it only presents credits and forms that can be fulfilled, in some cases, without an evaluation of energy modeling. As a methodology, the use of the ASHRAE 209-2018 standard is presented, which indicates a logical and sequential procedure to evaluate, calibrate and track the energy consumption during the entire design process of the building. DesignBuilder software techniques are indicated as necessary steps to evaluate a building in terms of energy efficiency. The expected results are the improvement of the quality and reliability of the energy design over time and all the environmental problems involved, such as the reduction of carbon emissions and the renewable energy used. The impact that the use of the ASHRAE 209-2018 standard would have when applied to buildings that seek to be zero energy, would lead to a paradigm shift in the design process, as well as in the operations and functioning of buildings. The area of energy simulations would be immensely favored because they would take advantage in the best ways of software's analysis tools.

**Keywords:** GBC Brasil zero energy, ASHRAE 209-2018, Zero net energy buildings, Design Builder, Building energy modelling.

## Introducción

Dentro del contexto mundial de búsqueda y mejora de la eficiencia energética del Acuerdo de París (COP21), IEA (2018), el World Green Building Council (WGBC) comenzó a trabajar en varios países con los Green Building Council locales para desarrollar nuevos sistemas de certificación de edificios "Zero Net Energy" entre ellos Brasil, y durante los años 2016 y 2017 fue elaborado tal sistema. Por otra parte la organización ASHRAE (American Society for Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) busca conseguir la autonomía energética (cero) y de bajo carbono hasta el año 2030 (Architecture 2030, 2018). Para efectuar la elaboración de la Guía de Referencia fueron invitados especialistas de las áreas de eficiencia energética y simulaciones de energía de la industria de la construcción y de universidades.

Como en la práctica y realidad nacional brasileñas las simulaciones de energía casi nunca son utilizadas como herramientas de apoyo a los proyectistas, la certificación GBC Zero Energy estaría promoviendo esta nueva realidad, pero para ello se hace necesario definir los parámetros que deben regir las evaluaciones. Es en este punto que se abre una oportunidad para hacer crecer la discusión y el conocimiento específico del área. El objetivo principal de este ensayo es desarrollar un modelo de referencia para una implantación inicial dando el apoyo a los proyectistas y simuladores de energía que deban evaluar los edificios que busquen esta certificación voluntaria. ¿Cómo ayudar al proceso de diseño para obtener edificios de bajo consumo de energía / alto desempeño energético (*high performance buildings*) a través de la utilización de software de modelado/simulaciones de energía?

## Estado del arte del problema

En 2017 fue lanzada en Brasil la primera certificación para edificios de consumo cero de energía con el Referencial GBC Brasil Zero Energy. Este sistema tiene aplicación en todo tipo de edificios que tengan una ocupación permanente; residencial, comercial, industrial, etc. Si bien para obtener la certificación es necesario un período de evaluación de desempeño energético de 12 meses después del edificio estar en operación, las ventajas y potencialidades que poseen las simulaciones de energía durante la etapa de proyectos puede ser el gran diferencial para producir edificios energéticamente eficientes, utilizando energías renovables para conseguir la meta de ser “Zero Energy”. Como poderosas herramientas de análisis, las simulaciones de energía sirven para prever futuros consumos e minimizarlos con las modificaciones de proyectos, a través softwares como DesignBuilder (Energyplus). Si bien en el crédito de “Eficiencia Energética Mínima para Generación Off Site” existen referencias a otras certificaciones ambientales que tienen consideradas normas internacionales como ASHRAE 90.1-2010, no hay referencias a normas que ayuden a los proyectistas para producir proyectos de alto desempeño energético, ni que indiquen un camino claro a seguir en este sentido, considerando que el edificio debe conseguir metas altas de eficiencia energética y bajo consumo de energía. Básicamente cualquier tipo de proyecto puede obtener la certificación si demuestra después de 12 meses de operación del edificio que los consumos de energía en kWh/año fueron igualados con los producidos a través de producción de energías renovables y compras de créditos de energía. El tema principal de análisis es cómo un estándar de apoyo específico al modelado de energía unido a las principales herramientas de los softwares de simulación como DesignBuilder (EnergyPlus), pueden ayudar para optimizar los proyectos para que sean más energéticamente eficientes.

## Metodología

La metodología de análisis considera 3 etapas; descripción de la Certificación GBC Zero Energy, Referencia Normativa (ASHRAE 209-2018) y Técnicas computacionales (herramientas DesignBuilder).

### Certificación GBC Zero Energy

La definición de “*Net Zero Energy Building*” indica que el edificio debe demostrar que el consumo de energía local de la operación anual es cero con una combinación de alta eficiencia energética y generación de energía por fuentes renovables. GBC Brasil (2018).

Para la obtención de la certificación GBC Brasil Zero Energy definitiva, todos los emprendimientos deberán tener por lo menos 1 año de operación monitoreado de forma continua con su balance energético anual cero. Edificios nuevos en fase de proyecto, construcción o menos de 1 año de operación que atiendan a los requisitos recibirán la Pre-Certificación.





Figura 1. Logotipo Certificación Zero Energy. Fuente: GBC Brasil, 2017.

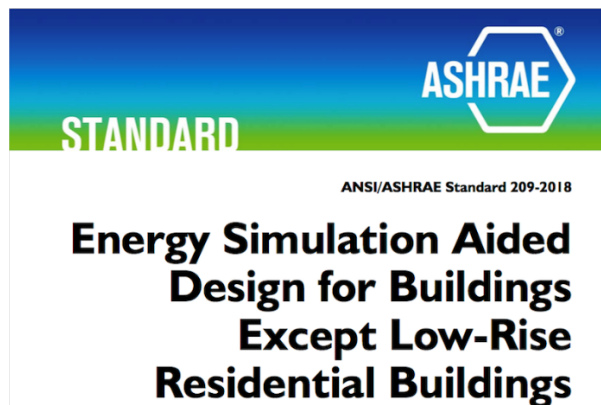


Figura 2. Portada Estándar ASHRAE 209-2018. Fuente: ASHRAE, 2018.

### Requisitos para Certificación:

1. Tiempo de funcionamiento: 12 meses de operación y medición de energía.
2. Tasa de ocupación mínima: Ocupación mínima media del 50% del área construida (no aplicable al residencial).
3. Metraje Mínimo de las Áreas Construidas: 100m<sup>2</sup> (no aplicable al residencial).
4. Tipología: edificio de uso permanente (no temporal).
5. Atención a las legislaciones: tiene que cumplir con la legislación pertinente (nacional, regional y local).
6. Emprendimiento Off Grid: En un máximo de 5% de energía fósil compensada por REC's (*renewable energy certificates*) o 100% de energía renovable.
7. Eficiencia Energética Mínima para Generación On Site: 100% de generación de energía renovable en el sitio.
8. Eficiencia Energética Mínima para Generación Off Site: cualquiera de las opciones mencionadas
  - Proyecto certificado LEED, GBC Brasil casa o condominio, AQUA-HQE, PBE Edifica A.
  - 5% de reducción anual de energía en relación con ASHRAE 90.1- 2010.
  - 18% de reducción de energía en relación con ASHRAE 90.1- 2007.
  - 30% de reducción de energía en relación con el DEO (Desempenho Energético Operacional em Edificações / Desempeño Energético Operacional en Edificaciones) del CBCS (Conselho Brasileiro de Construção Sustentável / Consejo Brasileño de Construcción Sostenible).
  - 15% de reducción de energía en relación con la media de 3 años continuos de los últimos 5 años.
9. Generación de energía renovable en el sitio: 100% de Generación de energía renovable en el sitio, o fuera del sitio, o la compra de créditos (REC's).
10. Generación de Energía Renovable Off Site: 100% de generación de energía renovable fuera de sitio, o compra de créditos.
11. Compra de créditos de energía renovable:
  - REC Brazil limitado al 10% del consumo anual (no aplicable a residencial).
  - REC Brazil para compensación de la tasa de disponibilidad (aplicable para residencial).
  - REC Brazil para compensación de fuentes de energía no eléctricas.
12. Uso de energía no renovable: Compensación del 100% de todas las fuentes de energía no renovable con la compra de créditos.
13. Balance Energético Anual del Emprendimiento:
  - El balance energético anual se ha restablecido por fuentes renovables o compra de créditos.
  - El balance energético anual fue cero con la adquisición de REC Brazil.

### Referencia Normativa (ASHRAE 209-2018)

La Certificación contempla referencias normativas nacionales (brasileñas) o internacionales como ASHRAE 90.1-2010 (utilizada para LEED Versión V4) para el requisito 9 – Eficiencia Energética Generación Off Site - siendo dejado a

criterio de cada equipo de proyecto utilizar el tipo de referencia para obtener el resultado deseado. A modo de unificación de criterios y para dar un sentido total al proceso de simulación de energía en todas las etapas de proyecto, se propone utilizar la Norma ANSI/ASHRAE Standard 209-2018 Energy Simulation Aided Design for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. (Diseño asistido por simulación de energía para edificios, excepto edificios residenciales de poca altura) (ASHRAE, 2018).

### Descripción Norma

Describe una metodología para aplicar el modelado de energía del edificio al proceso de diseño. El estándar fue creado para definir procedimientos confiables y consistentes que promuevan el uso de modelos de energía para cuantificar el impacto de las decisiones de diseño en el momento en que se están realizando. El estándar define los requerimientos generales de modelado acoplado con once ciclos de modelados, cada uno con metas específicas alineadas con las distintas etapas del diseño, construcción o proceso de operación. Cada ciclo es una extensión de los requerimientos generales de modelado, que representa una aproximación de mejores prácticas utilizando el modelado para dar informaciones al proceso de diseño. Siete de los ciclos coinciden con la etapa de diseño del edificio, tres ciclos son aplicados durante la construcción y uno ocurre en la post-ocupación. El análisis de post-ocupación es incluido para ayudar tanto al propietario como al modelador para entender los resultados modelados comparados con el desempeño actual de energía, y de esta manera entregar informaciones a la operación y suposiciones para ser usadas en futuros proyectos.

### Propósito

Definir los requisitos mínimos para proveer asistencia de diseño de energía usando simulaciones de energía del edificio y análisis.

### Funcionamiento

El modelador de energía deberá efectuar el modelado de energía en cada fase de la planificación, diseño, y construcción u operación del edificio según lo indicado en los requerimientos del propietario (*Owner Project Requirements – OPR*) o en un acuerdo entre propietario/modelador de energía utilizando la información obtenida de partes interesadas relevantes, que debe puede incluir al propietario, equipo de proyecto, constructores y operadores. El modelador deberá proveer los resultados de las simulaciones con opiniones y recomendaciones, como es requerido en cada ciclo de modelado siendo evaluado, para informar las decisiones de las partes interesadas (*stakeholders*).

### 11 Ciclos de Modelos de Diseño

#### Proyecto

1. Modelado de Cajas Simples: identificación de uso final de energía afectando el diseño conceptual.
2. Modelado de Diseño Conceptual: evaluación de mejoras a forma y arquitectura.
3. Modelado de Reducción de Cargas: evaluación de estrategias para reducir cargas de refrigeración y calefacción.
4. Modelado para Selección de Sistema de Acondicionamiento: identificación de impacto en la demanda y energía anual por sistemas de acondicionamiento climático.
5. Refinamiento del Diseño: evaluación de sistemas del edificio, confirmación de decisiones de diseño y posteriores intervenciones.
6. Integración de Diseño y Optimización: integración de sistemas del edificio a través de un proceso de optimización para conseguir metas de desempeño y explorar interacciones complejas entre múltiples variables.
7. Simulación de Energía para Ingeniería de Valor: provisión de informaciones para implicaciones holísticas de medidas de ingeniería de valor em metas de desempeño.

#### Operación y Construcción

8. Desempeño de energía “Como diseñado”: desarrollo de modelo de energía para representación del proyecto final y comparación con las metas de desempeño según lo diseñado.
9. Órdenes de modificaciones: proveer informaciones para las cambios que afectan las metas de desempeño de energía del proyecto.
10. Desempeño de energía “As built”: desarrollo de modelo de energía para representación del proyecto as built y comparación con las metas de desempeño del proyecto.

## Post-ocupación

11. Comparación de desempeño de energía post-ocupación: comparación del desempeño del último modelo de energía con la medición de uso de energía actual y condiciones climáticas del edificio en operación.

### Técnicas computacionales (herramientas designbuilder)

Cálculo de Cargas Térmicas (Heating & Cooling Design): si son utilizados sistemas activos de refrigeración / calefacción, el cálculo de cargas térmicas considerando los aspectos ambientales y constructivos de los proyectos se hace fundamental para mejorar reducir la necesidad de consumo de energía asociado.

Cálculo de Iluminación Natural (Daylighting): A través de la evaluación de iluminación natural es posible reducir el consumo de energía eléctrica asociada, maximizando el uso de iluminación natural. Al probar distintos tipos de sistemas de iluminación artificial, se evalúa el tipo de productos que menos energía consumen y al mismo tiempo atendiendo los requisitos mínimos indicados en las normativas.

Modelado de Paneles Fotovoltaicos (Photovoltaic System - PV): debido a las características necesarias de producción de energía en el local (*On Site*) la herramienta de modelado simple de paneles fotovoltaicos e colectores térmicos solares, es fundamental para modelar edificios de cero energía neta.

Cálculo de Consumo de Energía (Energyplus Simulation): obtención de los resultados de consumos en Kwh y de los costos permiten la evaluación, comparación y mejora dependiendo de cada ciclo de estudio en relación a la norma ASHRAE 209-2018.

Si bien la mayoría de los softwares de análisis de energía poseen las herramientas mencionadas, las características “amigables” de la interface gráfica (GUI – Graphic User Interface) unida al poderoso motor de simulación Energyplus (Simulation Engine) (Ibarra & Reinhardt, 2009) hacen a DesignBuilder una plataforma fácil de ser utilizada por los diversos profesionales involucrados en el proceso de diseño de energía de los edificios; arquitectos, ingenieros y evaluadores de energía. De esta forma en los 11 ciclos que el ensayo plantea, se hace más fácil la evaluación total y compatibilidad con sistemas como BIM (*Building Information Modeling*).

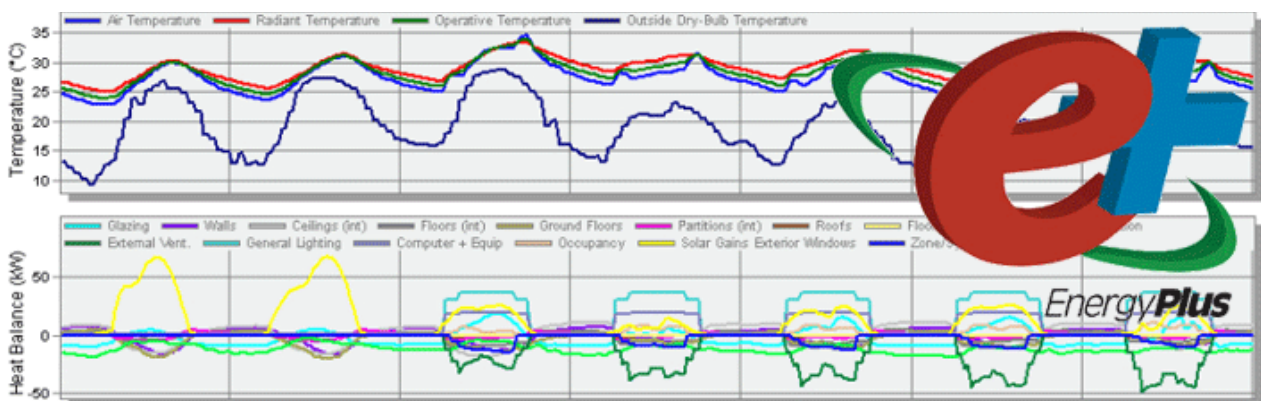


Figura 2. Motor de Simulación Energyplus en Designbuilder. Fuente: www.designbuilder.com, 2018.

## Resultados

Al aplicar la normativa como modelo de orientación práctica, se obtendrán las bases mejoradas de la Guía Net Zero que en la próxima versión considerará la reducción de las emisiones de carbono asociadas al impacto ambiental de los proyectos. Así también se contribuye para elevar el nivel de la calidad técnica de la industria de construcción en Brasil proyectando Edificios de Alto desempeño energético y ambiental (*High Performance Buildings*) ya evaluados a través de simulaciones de energía.

## Discusión y Conclusiones



El área de simulaciones de energía, representado por IBPSA Brasil (e internacional) puede verse inmensamente beneficiada debido al compromiso que debe ser adquirido para que los profesionales de modelado de energía en edificios trabajen en todo el proceso de diseño, desde la etapa conceptual hasta la post-ocupación. De esta forma se obtienen los mejores resultados y desempeño energético de los edificios y se aprovechan al máximo los recursos y herramientas de análisis que los programas computacionales como Designbuilder ofrecen.

## Agradecimientos

A la Sra. Juliana Martins por apoyar este ensayo, al GBC Brasil por invitarme a participar del Comité Técnico en la certificación Zero Energy en 2017 y a la organización IBPSA Latam 2018 por la invitación a desarrollar el tema.

## Referencias

- Architecture 2030 (2018). The 2030 Challenge. Recuperado 17 de Agosto de 2018 de [http://architecture2030.org/2030\\_challenges/2030-challenge](http://architecture2030.org/2030_challenges/2030-challenge)
- ASHRAE (2018). ASHRAE Publishes Energy Simulation-Aided Design Standard. Recuperado 17 de Agosto de 2018 de <https://www.ASHRAE.org/about/news/2018/ASHRAE-publishes-energy-simulation-aided-design-standard>
- DesignBuilder (2018). DesignBuilder - Simulation Made Easy. Recuperado 17 de Agosto de 2018 de <https://www.designbuilder.co.uk>
- GBC Brasil (2017), Comité Técnico. Referencial Net Zero 1ª Edição. São Paulo.
- GBC Brasil (2018). Compreenda o GBC Brasil Zero Energy. Recuperado 17 de Agosto de 2018 <http://www.gbcbrazil.org.br/zero-energy.php>
- Ibarra, D., Reinhardt, C. (2009). Desing Builder // Energy plus. Recuperado 17 de Agosto de [http://web.mit.edu/SustainableDesignLab/projects/TeachingResources/EnergyModellingI\\_GettingStarted.pdf](http://web.mit.edu/SustainableDesignLab/projects/TeachingResources/EnergyModellingI_GettingStarted.pdf)
- IEA (2018). IEA at COP21. Recuperado 17 de Agosto de <http://www.iea.org/COP21/>



# Impacto del desempeño energético de la vivienda unifamiliar actual bajo escenarios futuros del cambio climático.

## Impact in annual energy demand in single-family houses under future scenarios of climate change.

### Natalia González Olave

Filiación: Universidad del Bío-Bío  
Dirección: Collao #1202, Concepción CP 4051381  
Correo: natalia.gonzalez1602@alumnos.ubiobio.cl

### Paulina Wegertseder Martínez

Filiación: Universidad del Bío-Bío  
Dirección: Collao #1202, Concepción CP 4051381  
Correo: pwegertseder@ubiobio.cl

**Manuscript Code:** 009

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

### Resumen

El cambio climático, sus efectos y cómo podemos evitarlo se encuentra hoy en diversas plataformas de información. El gobierno publica una variedad de estrategias de mitigación climática, pero son sólo estándares y no consideran la demanda de refrigeración en las viviendas, a pesar del aumento de las temperaturas. El objetivo de este estudio es evaluar el aumento en el consumo de energía en dos tipos diferentes de viviendas en los futuros escenarios del cambio climático. Este estudio se usó la herramienta CCWorldWeatherGen generar futuros datos climáticos como, 2020, 2050 y 2080 en Temuco, Chile. Se hicieron predicciones para el escenario de emisión de gases de efecto invernadero más extenso, A2 según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). El nivel de confort se analizó utilizando un enfoque adaptativo incluido en los estándares ASHRAE. Los resultados muestran que la demanda de refrigeración aumentará considerablemente a finales de siglo, la calefacción disminuirá y el aumento de la temperatura produce mayores niveles de confort. Con estos resultados, se proponen estrategias para los diferentes casos y escenarios.

**Palabras claves:** Cambio climático; Demanda de refrigeración; Desempeño energético; Viviendas; Confort.

### Abstract

Climate change, its effects and how we can avoid it is today found in various information platforms. The government publishes a variety of climate mitigation strategies, but they are only standards and do not consider the demand for refrigeration in the houses, despite the increase in temperatures. The objective of this study is to evaluate the effect on the increase of the energy consumed in two different types of houses under the future scenarios of climate change. This study used the CCWorldWeatherGen to generate weather data for future typical meteorological years, such as 2020, 2050, and 2080, for Temuco, Chile. Predictions were made for the carbon emission scenario, A2 according to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The comfort level was analyzed using an adaptive approach included in the ASHRAE standards. The results show that the cooling demand will increase considerably at the end of the century and the heating will decrease, the increase in temperature produces higher comfort levels. With these results, adaptation strategies are proposed for the different cases and scenarios.

**Keywords:** Climate change; Cooling demand; Energy demand; Single-family houses; Comfort.

## Introducción

Cualquier medida para disminuir el gasto energético, desalentar el aumento de los gases de efecto invernadero (GEI), siendo la construcción su principal fuente emisora, genera un beneficio para el medioambiente. En Chile el sector residencial consume más del 70% de la energía en comparación a los sectores de comercio y edificios públicos. Como País se establecieron diversos planes de mitigación al cambio climático, liderados por el Ministerio del Medioambiente y Energía y Ministerio de Vivienda y Urbanismo, tales como; Plan de descontaminación atmosférica (PDA), Código de construcción sustentable para viviendas (CCSV), Normas técnicas MINVU 011 (NTM 011), entre otros. Se estableció el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en el año 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Hay varios estudios que muestran el aumento de la temperatura global (Jentsch, Bahaj y James, 2008; Ren, Chen y Wang, 2011). Aunque varían de una zona climática a otra, esto seguramente causará una mayor demanda de energía en la construcción (Karimpour, Belusko, Xing, Boland y Bruno, 2015) (Shourav et al., 2017). Las predicciones que ha publicado el IPCC ha indicado que el aumento de la temperatura global en distintos escenarios sería desde 1.1 – 2.9°C a 2.4 – 6.4°C a finales del siglo XXI (Jentsch et al., 2008) La mitigación de los gases de efecto invernadero y la adaptación al cambio climático deberían agregarse a nuestros códigos y normas de construcción (Kwok y Rajkovich, 2010). Las casas consumen

aproximadamente un tercio de la energía, en países con un clima templado, más de la mitad de esta energía se usa generalmente para calefacción (Isaac y Van Vuuren, 2008). Edificaciones ubicadas en regiones con un incremento estimado en su temperatura requerirán una mayor demanda en la refrigeración y menor demanda de calefacción. Además, la incertidumbre en la predicción del clima afectará en la efectividad y sustentabilidad de la construcción, la calidad de aire interior y en su confort térmico (Yau & Hasbi, 2017). La demanda de energía en las viviendas se ve influenciada por varios factores tales como, climático (Zhu et al., 2013); radiación solar, velocidad del viento, humedad ambiental, entre otros. También las características del edificio (Shourav et al., 2017) tales como, la envolvente, forma, materialidad, cargas internas, aire acondicionado y equipo de ventilación.

La finalidad del estudio es evidenciar la influencia de los futuros climas en el desempeño de una vivienda tipo en la ciudad, como afecta en las demandas energéticas y en el confort interior. Se utilizará un modelo escenario-base para estimar la demanda de energía de las casas unifamiliares nuevas.

## Estado del arte del problema

A pesar de la evidencia del cambio climático, el tema no se encuentra bajo ninguna normativa chilena. En Chile, solo existen estándares que ayudan a mitigar las consecuencias, como el Código de Construcción Sustentable para la Vivienda (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2014) que establece límites para las demandas de energía para los años 2020, 2030, 2040 y 2050 (Tabla 1). Aunque se muestran valores para la demanda de refrigeración, estos indican que el valor máximo es 0 kWh / m<sup>2</sup> en la zona F donde se encuentra la ciudad estudiada.

**Tabla 2:** Demanda de enfriamiento, Fuente: CCSV, MINVU 2015

| Zonas térmicas  | Demanda de enfriamiento (kWh/m <sup>2</sup> ) |      |      |      |
|-----------------|---|------|------|------|
|                 | 2020  | 2030 | 2040 | 2050 |
| Zone A          | 5.7   | 4.0  | 3.0  | 2.0  |
| Zone B          | 5.5   | 4.0  | 3.0  | 2.0  |
| Zone C          | 1.0   | 0.7  | 0.0  | 0.0  |
| Zone D          | 4.4   | 3.0  | 2.0  | 1.0  |
| Zone E          | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0  |
| Zone F (Temuco) | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0  |
| Zone G          | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0  |
| Zone H          | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0  |
| Zone I          | 5.7   | 4.0  | 3.0  | 2.0  |

## Metodología

Este estudio se desarrolló a través de programas de simulación en diferentes etapas, generación del clima future de la ciudad a estudiar, evaluación de las demandas de las viviendas en el escenario actual y a futuro y establecer las estrategias de mejoramiento a emplear (Figura 1).

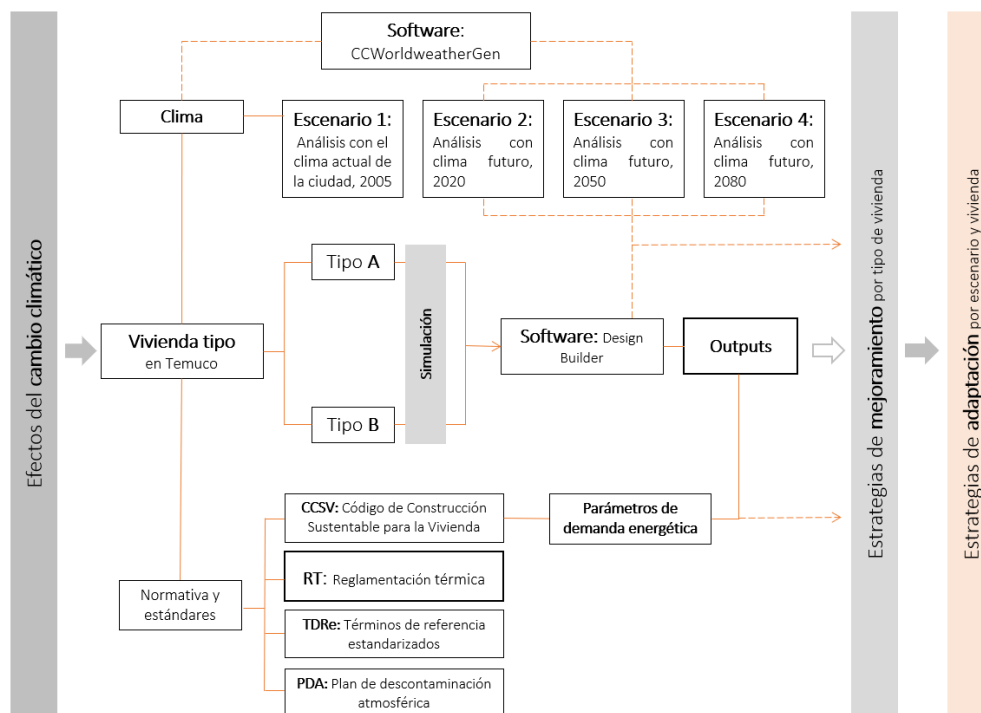


Figura 2: Metodología. Elaboración por el autor, 2018.

## Casos de estudio

Las casas a estudiar fueron los casos más representativos en viviendas unifamiliar que se estaban construyendo en la ciudad de Temuco. Se eligieron dos tipos de viviendas, ambas con similares características de acuerdo a su material, superficies y sistema de agrupamiento.

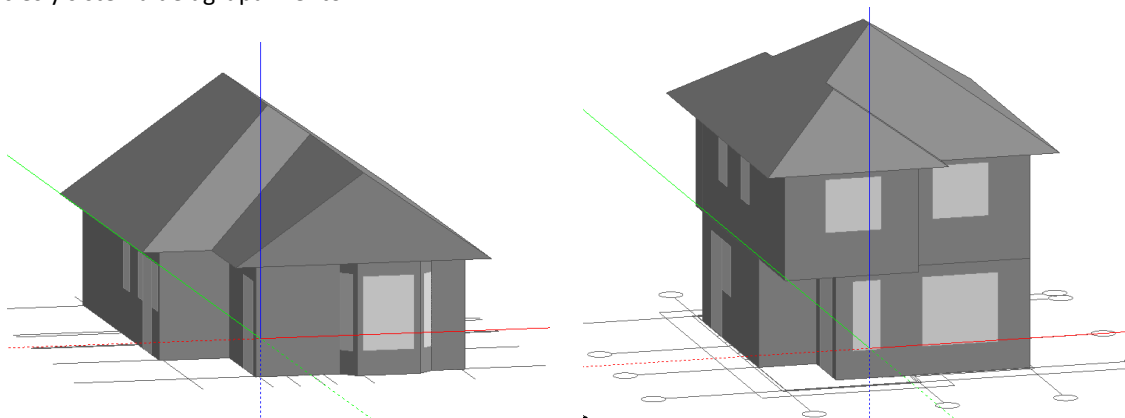


Figura 3: Casos de estudio: viviendas unifamiliares. Elaboración propia (Design Builder), 2018.

La vivienda tipo A, corresponde a la casa de un piso, con muros de albañilería, ventanas simples con marco de aluminio y con una superficie de 57 m<sup>2</sup>. La Vivienda tipo B, a diferencia de la anterior, posee dos niveles, la materialidad de la casa es de ladrillo en el primer piso y en el segundo nivel la estructura es de Metalcon revestido con tinglado de fibrocemento y ventanas simples con marcos de aluminio.

## Escenario climático

Los casos de estudio se encuentran en Temuco capital de la IX región, se encuentra en la longitud 072 ° 35'54.31 " y la latitud S38 ° 44'22.74 ". El clima de la ciudad está categorizado bajo la clasificación climática de Koppen como Cfb, clima templado oceánico, sin estación seca. El promedio de las temperaturas anual de la ciudad actualmente oscila, de 3°C hasta 26°C. La temperatura media es de 11°C y la temperatura peak alcanzada es de 33°C, en el mes de febrero.

Los datos climáticos futuros se construyeron utilizando la herramienta CCWorldWeatherGen del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), en los años 2020, 2050 y 2080, bajo el escenario A2 emisiones

moderadas de GEI. Para el futuro, las proyecciones climáticas pronosticadas para la ciudad indican un aumento en el número de días calurosos y una reducción en el número de días fríos (Gráfico 1).

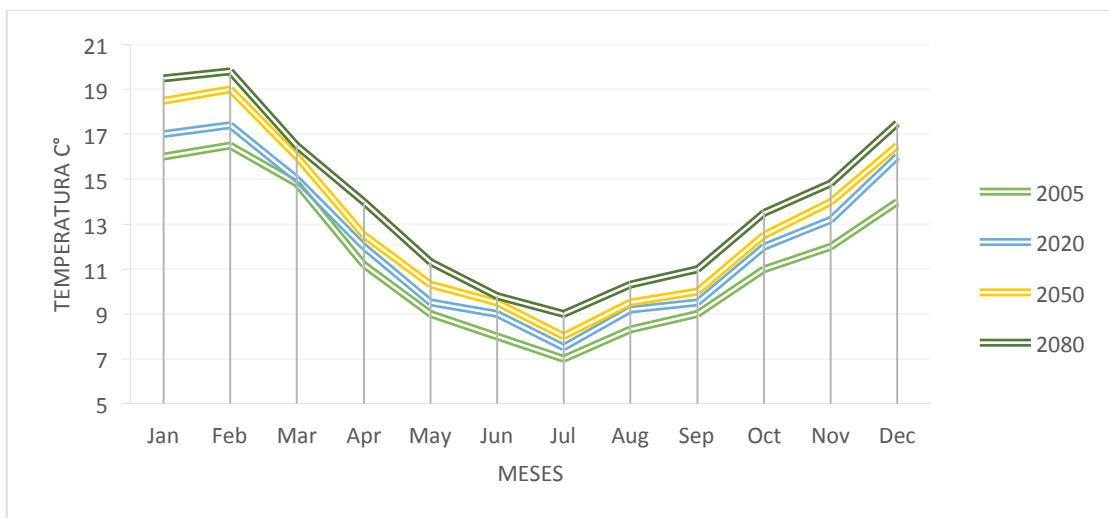


Gráfico 1: Comparación entre los escenarios. Elaborado por el autor.

### Modelo de simulación

Ambas viviendas se simularon en el escenario actual, con datos climáticos históricos de la ciudad para obtener las demandas energéticas, en el software Design Builder generando los casos bases para compararlos con los escenarios futuros. Para determinar el impacto del cambio climático, el software analizó la demanda de energía en cada escenario y el confort al interior de ambas casas. Los parámetros para la simulación se muestran en la Tabla 2.

Tabla 3: Parámetros para simulación. Elaborado por el autor, 2018.

| Condiciones de borde viviendas 57 y 64 m <sup>2</sup> |                  |                       |                            |
|---|------------------|-----------------------|----------------------------|
| Actividad   | Uso vivienda     | Horario semana        | 20:00 - 8:00 13:30 - 14:30 |
|   |                  | Horario fin de semana | Todo el día                |
| Iluminación   | Uso vivienda     | Horario semana        | 6:00 - 8:00 19:00 - 00:00  |
|   |                  | Horario fin de semana | 18:00 - 01:00              |
| Densidad de ocupación                                 | 0,07             |                       |                            |
| Calendario ocupación                                  | 1/2 día          |                       |                            |
| Calefacción Setpoint T°                               | Heating          | 18,0 °C               |                            |
|   | Heating set back | 12                    |                            |
|   | Cooling          | 25                    |                            |
|   | Cooling set back | 28                    |                            |
| Confort   | Adaptativo       |                       |                            |
| Infiltración  | 1 (ac/h)         | On 24/7               |                            |

| CONFORT ADAPTATIVO |             |               |               |               |             |          |
|--------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|-------------|----------|
| Cold               | Cool        | Slightly Cool | Confort       | Slightly Warm | Warm        | Hot      |
| > - 17°C           | 17,5 - 20°C | 20°C - 21°C   | 21°C - 25,5°C | 25,5 - 26,5   | 26,5 - 27,5 | 27,5 - < |

## Resultados

### Escenarios climáticos simulados

Como se muestra en la Tabla 3, ambos modelos no cumplen con la demanda de refrigeración en los años 2020 y 2050. En el caso de la casa tipo B en 2050, la demanda de calefacción no cumplirá con las normas CCSV.



Tabla 4: Comparación del caso base con la normativa CCSV. Elaborado por el autor.

| CASO BASE 57 |             |                     |               |                     | CCSV - Zona F |                     |        |               |                     |        |
|--------------|-------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|--------|---------------|---------------------|--------|
| Año          | Calefacción |                     | Refrigeración |                     | Calefacción   |                     | Cumple | Refrigeración |                     | Cumple |
| ACTUAL       | 38,5        | kW/h m <sup>2</sup> | 1,3           | kW/h m <sup>2</sup> | -             |                     |        |               |                     |        |
| 2020         | 29,6        | kW/h m <sup>2</sup> | 3,7           | kW/h m <sup>2</sup> | 135           | kW/h m <sup>2</sup> | √      | 0             | kW/h m <sup>2</sup> | X      |
| 2050         | 26          | kW/h m <sup>2</sup> | 5,5           | kW/h m <sup>2</sup> | 30            | kW/h m <sup>2</sup> | √      | 0             | kW/h m <sup>2</sup> | X      |
| 2080         | 20,4        | kW/h m <sup>2</sup> | 9,7           | kW/h m <sup>2</sup> | -             |                     |        |               |                     |        |
| CASO BASE 64 |             |                     |               |                     | CCSV - Zona F |                     |        |               |                     |        |
| Año          | Calefacción |                     | Refrigeración |                     | Calefacción   |                     | Cumple | Refrigeración |                     | Cumple |
| ACTUAL       | 45,4        | kW/h m <sup>2</sup> | 1,9           | kW/h m <sup>2</sup> | -             |                     |        |               |                     |        |
| 2020         | 35          | kW/h m <sup>2</sup> | 5,3           | kW/h m <sup>2</sup> | 135           | kW/h m <sup>2</sup> | √      | 0             | kW/h m <sup>2</sup> | X      |
| 2050         | 30,6        | kW/h m <sup>2</sup> | 7,4           | kW/h m <sup>2</sup> | 30            | kW/h m <sup>2</sup> | X      | 0             | kW/h m <sup>2</sup> | X      |
| 2080         | 23,9        | kW/h m <sup>2</sup> | 12,6          | kW/h m <sup>2</sup> | -             |                     |        |               |                     |        |

En Tabla 4, el porcentaje de confort va en aumento a través de los escenarios demostrando el alza de temperaturas mínimas y máximas al interior de la vivienda. La temperatura mínima entre el escenario actual proyectado al 2080 aumenta en 1°C y la temperatura máxima a 2°C.

Tabla 4: Comparación confort y variación en las temperaturas. Elaborado por el autor.

| TIPO   | MEJORA | ESCENARIO | T° mínima int. |        | T° promedio | T° máxima int. |        | Confort % |
|--------|--------|-----------|----------------|--------|-------------|----------------|--------|-----------|
|        |        |           | C°             | Fecha  | C°          | C°             | Fecha  |           |
| Tipo A | BASE   | 2005      | 11,4           | 06-jul | 19,5        | 27,3           | 22-feb | 41,19     |
|        |        | 2020      | 11,7           | 06-jul | 20,2        | 28,3           | 22-feb | 49,54     |
|        |        | 2050      | 12             | 06-jul | 20,5        | 28,7           | 22-feb | 52,6      |
|        |        | 2080      | 12,4           | 06-jul | 21          | 29,4           | 22-feb | 57,21     |
| Tipo B | BASE   | 2005      | 11,7           | 06-jul | 19,7        | 28,5           | 22-feb | 44,33     |
|        |        | 2020      | 12             | 06-jul | 20,5        | 29,6           | 22-feb | 51,8      |
|        |        | 2050      | 12,3           | 06-jul | 20,8        | 30             | 22-feb | 54,3      |
|        |        | 2080      | 12,7           | 06-jul | 21,4        | 30,8           | 22-feb | 59,4      |

### Estrategias de mejoramiento

En los resultados indican un alza en la demanda de refrigeración para disminuir esta demanda se proponen diferentes estrategias de mejoramiento pasivas (Bustamante, 2007; D’alencon, 2008): cambio del tipo de vidrio, de vidrio simple a doble (M1), añadir mayor aislación en muros exteriores (M2), implementar dos rejillas de ventilación en la techumbre (M3) y la combinación de estas mejoras (Graficos 2 – 7).

Grafico 2: M1, Doble vidrio hermético. Elaborado por el autor.

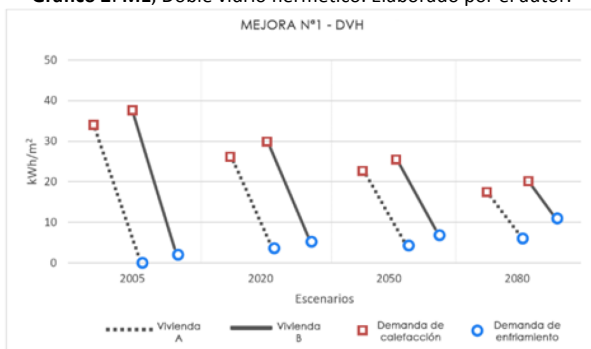
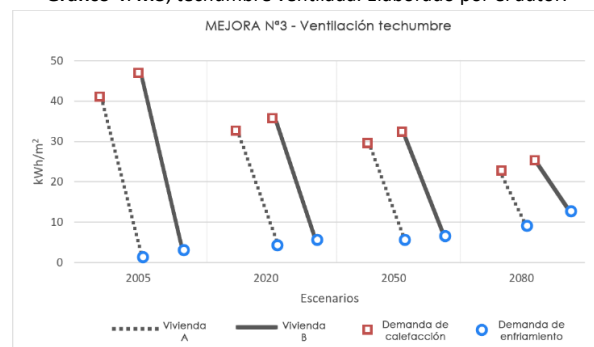
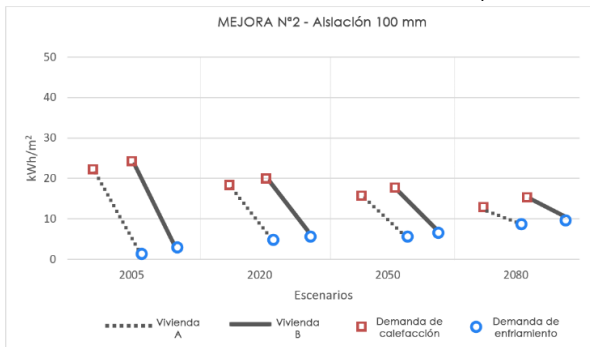


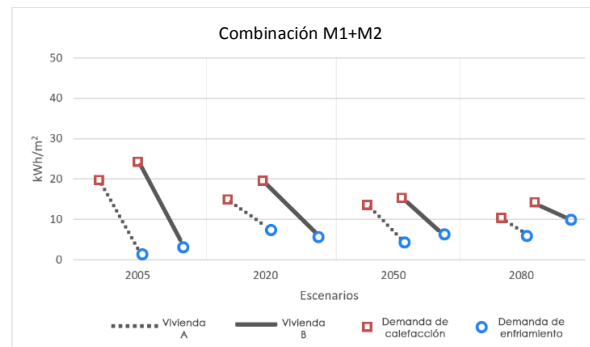
Grafico 4: M3, techumbre ventilada. Elaborado por el autor.



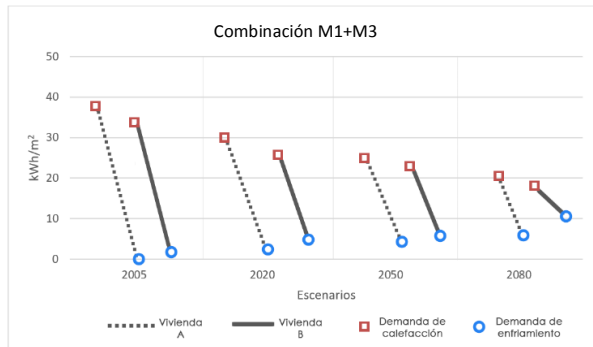
**Gráfico 3: M2, Aislación en muros 100mm. Elaborado por el autor.**



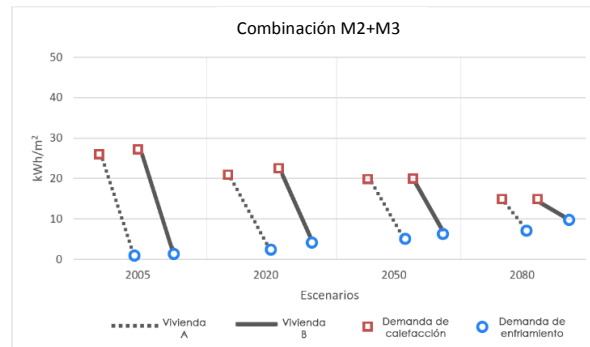
**Gráfico 5: Doble vidrio hermético + Aislación.**



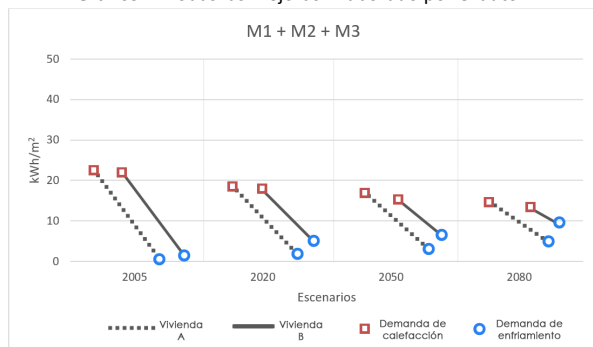
**Gráfico 2: Doble vidrio hermético + Techumbre ventilada.**



**Gráfico 3: Aislación muros + techumbre ventilada.**



**Gráfico 4: Todas las mejoras. Elaborado por el autor.**



En todos los casos la demanda de refrigeración sufrió un aumento en especial en los últimos escenarios, una situación contraria ocurrió con la demanda de calefacción que fue en disminución. Comparando ambas viviendas, la del tipo B tiene un mejor comportamiento en las demandas energéticas frente a la vivienda A.

En general, la mejora que tiene mejor rendimiento en ambas viviendas es la combinación M1+M2+M3 (Tabla 4 y 5)

**Tabla 5:** Mejora M1+M2+M3 comparada con la normativa CCSV. Elaborado por el autor.

| M1 + M2 + M3    |             |                     |               |                     |               |             |                     |        |               |                     |        |
|-----------------|-------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|-------------|---------------------|--------|---------------|---------------------|--------|
| A - Vivienda 57 |             |                     |               |                     | CCSV - Zona F |             |                     |        |               |                     |        |
| Año             | Calefacción |                     | Refrigeración |                     | Confort       | Calefacción |                     | Cumple | Refrigeración |                     | Cumple |
| ACTUAL          | 23,6        | kW/h m <sup>2</sup> | 1,0           | kW/h m <sup>2</sup> | 58,60%        | -           |                     |        |               |                     |        |
| 2020            | 19,3        | kW/h m <sup>2</sup> | 2,6           | kW/h m <sup>2</sup> | 65,73%        | 135         | kW/h m <sup>2</sup> | √      | 0             | kW/h m <sup>2</sup> | X      |
| 2050            | 17,0        | kW/h m <sup>2</sup> | 3,7           | kW/h m <sup>2</sup> | 68,69%        | 30          | kW/h m <sup>2</sup> | √      | 0             | kW/h m <sup>2</sup> | X      |
| 2080            | 13,5        | kW/h m <sup>2</sup> | 6,5           | kW/h m <sup>2</sup> | 74,70%        | -           |                     |        |               |                     |        |
| B - Vivienda 64 |             |                     |               |                     | CCSV - Zona F |             |                     |        |               |                     |        |
| Año             | Calefacción |                     | Refrigeración |                     | Confort       | Calefacción |                     | Cumple | Refrigeración |                     | Cumple |
| ACTUAL          | 22,2        | kW/h m <sup>2</sup> | 1,9           | kW/h m <sup>2</sup> | 69,39%        | -           |                     |        |               |                     |        |
| 2020            | 18,0        | kW/h m <sup>2</sup> | 4,3           | kW/h m <sup>2</sup> | 77,37%        | 135         | kW/h m <sup>2</sup> | √      | 0             | kW/h m <sup>2</sup> | X      |
| 2050            | 15,7        | kW/h m <sup>2</sup> | 6,0           | kW/h m <sup>2</sup> | 80,37%        | 30          | kW/h m <sup>2</sup> | √      | 0             | kW/h m <sup>2</sup> | X      |
| 2080            | 12,3        | kW/h m <sup>2</sup> | 9,8           | kW/h m <sup>2</sup> | 83,65%        | -           |                     |        |               |                     |        |

**Tabla 5:** Mejora M1+M2+M3, variación de temperaturas en viviendas. Elaborado por el autor.

| TIPO   | MEJORA       | ESCENARIO | T° mínima int. |        | T° promedio |      | T° máxima int. |       | Confort % |
|--------|--------------|-----------|----------------|--------|-------------|------|----------------|-------|-----------|
|        |              |           | C°             | Fecha  | C°          | C°   | Fecha          |       |           |
| Tipo A | M1 + M2 + M3 | 2005      | 13,3           | 06-jul | 20,7        | 26,4 | 22-feb         | 58,6  |           |
|        |              | 2020      | 13,6           | 06-jul | 21,2        | 27,2 | 22-feb         | 65,7  |           |
|        |              | 2050      | 13,9           | 06-jul | 21,4        | 27,4 | 22-feb         | 68,6  |           |
|        |              | 2080      | 14,3           | 06-jul | 21,9        | 27,9 | 22-feb         | 74,7  |           |
| Tipo B | M1 + M2 + M3 | 2005      | 14,3           | 06-jul | 21,4        | 27,3 | 22-feb         | 69,4  |           |
|        |              | 2020      | 14,6           | 06-jul | 21,9        | 28   | 22-feb         | 77,37 |           |
|        |              | 2050      | 14,9           | 06-jul | 22,1        | 28,3 | 22-feb         | 80,37 |           |
|        |              | 2080      | 15,3           | 06-jul | 22,6        | 28,8 | 22-feb         | 83,6  |           |

Como resultado del análisis de las estrategias de mejora y las combinaciones a través de los diferentes escenarios para los tipos A y B, se proponen estrategias adaptativas independientes para cada vivienda.

### Estrategias de adaptación

Las estrategias de adaptación se consideran mejoras en las que las viviendas tuvieron un mejor rendimiento individualmente, manteniendo un equilibrio en las demandas de calefacción, refrigeración y considerando el confort interior en las viviendas.

En el caso de la vivienda tipo A, la mejora a implementar en el escenario actual es el cambio de las ventanas simples por vidrio doble hermético, en el escenario 2020 implementar la aislación en los muros (M2). Con esas dos mejoras la vivienda lograría su mejor desempeño incluso en el año 2080 (Tabla 6)

**Tabla 6:** Estrategias de adaptación para la Vivienda tipo A. Preparado por el autor.

| CASO BASE | Demanda Calefacción      | Demanda Refrigeración    | Confort                  |                         |                       |         |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|---------|
|           | 38,5 kW/h m <sup>2</sup> | 1,3 kW/h m <sup>2</sup>  | 41%                      |                         |                       |         |
| M1        | ACTUAL                   | Demanda Calefacción      | Demanda Refrigeración    | Confort                 |                       |         |
|           |                          | 34,4 kW/h m <sup>2</sup> | 0,9 kW/h m <sup>2</sup>  | 42,10%                  |                       |         |
|           |                          | M2 (M1+M2)               | 2020                     | Demanda Calefacción     | Demanda Refrigeración | Confort |
|           |                          |                          | 15,6 kW/h m <sup>2</sup> | 2,9 kW/h m <sup>2</sup> | 67,40%                |         |
| M1+M2     | 2050                     | Demanda Calefacción      | Demanda Refrigeración    | Confort                 |                       |         |
|           | 13,6 kW/h m <sup>2</sup> | 4,1 kW/h m <sup>2</sup>  | 70,53%                   |                         |                       |         |
| M1+M2     | 2080                     | Demanda Calefacción      | Demanda Refrigeración    | Confort                 |                       |         |
|           | 10,7 kW/h m <sup>2</sup> | 6,9 kW/h m <sup>2</sup>  | 76,91%                   |                         |                       |         |

**Tabla 7:** Confort térmico caso base (izquierda) y mejoras (derecha) Tipo A. Preparado por el autor.

| TIPO A     | BASE |      |      |      | TIPO A     | BASE | M1   | M1 + M2 |      |      |
|------------|------|------|------|------|------------|------|------|---------|------|------|
|            | 2005 | 2020 | 2050 | 2080 |            | 2005 | 2005 | 2020    | 2050 | 2080 |
| ENERO      | 100% | 100% | 99%  | 96%  | ENERO      | 100% | 100% | 100%    | 100% | 99%  |
| FEBRERO    | 96%  | 99%  | 98%  | 93%  | FEBRERO    | 96%  | 96%  | 100%    | 99%  | 98%  |
| MARZO      | 89%  | 97%  | 99%  | 99%  | MARZO      | 89%  | 92%  | 100%    | 100% | 100% |
| ABRIL      | 22%  | 43%  | 53%  | 71%  | ABRIL      | 22%  | 25%  | 86%     | 90%  | 96%  |
| MAYO       | 4%   | 7%   | 10%  | 14%  | MAYO       | 4%   | 3%   | 27%     | 36%  | 58%  |
| JUNIO      | 0%   | 0%   | 1%   | 4%   | JUNIO      | 0%   | 0%   | 19%     | 25%  | 34%  |
| JULIO      | 0%   | 0%   | 0%   | 1%   | JULIO      | 0%   | 0%   | 6%      | 9%   | 16%  |
| AGOSTO     | 1%   | 3%   | 4%   | 8%   | AGOSTO     | 1%   | 1%   | 28%     | 35%  | 49%  |
| SEPTIEMBRE | 2%   | 13%  | 18%  | 26%  | SEPTIEMBRE | 2%   | 2%   | 55%     | 62%  | 80%  |
| OCTUBRE    | 33%  | 54%  | 65%  | 80%  | OCTUBRE    | 33%  | 35%  | 92%     | 93%  | 96%  |
| NOVIEMBRE  | 59%  | 83%  | 89%  | 97%  | NOVIEMBRE  | 59%  | 61%  | 99%     | 99%  | 100% |
| DICIEMBRE  | 92%  | 100% | 100% | 99%  | DICIEMBRE  | 92%  | 93%  | 100%    | 100% | 100% |

La tabla 7 muestra una comparación del confort en los escenarios del caso base de la vivienda A, donde existe un incremento del confort en el mes más frío (julio) en un 1% considerando que no hay mejoras implementadas, demostrando el aumento de la temperatura exterior. Y la tabla de la derecha, muestra el confort en las estrategias de adaptación, comparándolas con el caso base existe un incremento en todos los meses. En especial en la época de invierno, donde en confort empieza en un 0% hasta llegar en un 16% con las mejoras planteadas y en verano se logra aumentar el confort de un 96% a 99%.

En la vivienda tipo B, la mejora a implementar en el escenario actual es el cambio de las ventanas simples por vidrio doble hermético, en el escenario 2020 implementar la aislación en los muros (M2) y en el escenario 2050 incorporar rejillas de ventilación a la techumbre.

**Table 8:** Estrategias de adaptación para la Vivienda tipo B. Preparado por el autor.

| CASO                 | Demanda Calefacción      | Demanda Refrigeración   | Confort |
|----------------------|--------------------------|-------------------------|---------|
| <b>BASE</b>          | 45,4 kW/h m <sup>2</sup> | 1,9 kW/h m <sup>2</sup> | 44%     |
| <b>M1</b>            | <b>ACTUAL</b>            |                         |         |
|                      | Demanda Calefacción      | Demanda Refrigeración   | Confort |
|                      | 38,7 kW/h m <sup>2</sup> | 1,8 kW/h m <sup>2</sup> | 46,59%  |
| <b>M2 (M1+M2)</b>    | <b>2020</b>              |                         |         |
|                      | Demanda Calefacción      | Demanda Refrigeración   | Confort |
|                      | 19,4 kW/h m <sup>2</sup> | 4,6 kW/h m <sup>2</sup> | 73,66%  |
| <b>M3 (M1+M2+M3)</b> | <b>2050</b>              |                         |         |
|                      | Demanda Calefacción      | Demanda Refrigeración   | Confort |
|                      | 15,7 kW/h m <sup>2</sup> | 6 kW/h m <sup>2</sup>   | 80,37%  |
| <b>M1+M2+M3</b>      | <b>2080</b>              |                         |         |
|                      | Demanda Calefacción      | Demanda Refrigeración   | Confort |
|                      | 12,3 kW/h m <sup>2</sup> | 9,8 kW/h m <sup>2</sup> | 83,65%  |

**Tabla 9:** Confort térmico caso base (izquierda) y mejoras (derecha) Tipo B. Preparado por el autor.

| TIPO B     | BASE |      |      |      | TIPO B     | BASE | M1   | M1 + M2 | M1 + M2 + M3 |      |
|------------|------|------|------|------|------------|------|------|---------|--------------|------|
|            | 2005 | 2020 | 2050 | 2080 |            | 2005 | 2005 | 2020    | 2050         | 2080 |
| ENERO      | 99%  | 97%  | 94%  | 91%  | ENERO      | 99%  | 100% | 98%     | 99%          | 96%  |
| FEBRERO    | 96%  | 92%  | 89%  | 84%  | FEBRERO    | 96%  | 98%  | 90%     | 96%          | 91%  |
| MARZO      | 92%  | 96%  | 97%  | 95%  | MARZO      | 92%  | 95%  | 99%     | 100%         | 97%  |
| ABRIL      | 34%  | 55%  | 63%  | 80%  | ABRIL      | 34%  | 40%  | 92%     | 96%          | 99%  |
| MAYO       | 7%   | 11%  | 13%  | 19%  | MAYO       | 7%   | 8%   | 44%     | 63%          | 76%  |
| JUNIO      | 1%   | 3%   | 7%   | 14%  | JUNIO      | 1%   | 1%   | 30%     | 38%          | 44%  |
| JULIO      | 2%   | 3%   | 5%   | 7%   | JULIO      | 2%   | 0%   | 16%     | 24%          | 33%  |
| AGOSTO     | 5%   | 9%   | 11%  | 21%  | AGOSTO     | 5%   | 5%   | 50%     | 63%          | 75%  |
| SEPTIEMBRE | 9%   | 20%  | 24%  | 34%  | SEPTIEMBRE | 9%   | 9%   | 74%     | 91%          | 99%  |
| OCTUBRE    | 37%  | 58%  | 67%  | 81%  | OCTUBRE    | 37%  | 43%  | 94%     | 97%          | 98%  |
| NOVIEMBRE  | 61%  | 82%  | 87%  | 95%  | NOVIEMBRE  | 61%  | 69%  | 100%    | 100%         | 100% |
| DICIEMBRE  | 92%  | 98%  | 97%  | 93%  | DICIEMBRE  | 92%  | 95%  | 99%     | 99%          | 96%  |

La tabla 9, muestra el cambio del confort al interior de la vivienda tipo B en los escenarios. A diferencia del caso anterior, esta vivienda tiene mayores diferencias en sus resultados, teniendo en verano un descenso del confort de un 99% a 91% y en invierno un aumento de este de un 2% a 7% en el 2080. Con la implementación de las estrategias de mejoramiento en la vivienda tipo B, hay un aumento en el confort interior, especialmente en época de invierno, como se muestra en la tabla 9 (derecha).

## Discusión y Conclusiones

Las simulaciones en los distintos escenarios (años) muestran que debido al clima en la ciudad de Temuco se generaría un aumento de las temperaturas y disminución de la humedad del aire. En términos generales lo ocurrido en los distintos escenarios fue similar, el aumento drástico de la demanda de refrigeración y la continua baja de la demanda de calefacción fue una constante que no diferenció tipo de vivienda ni año simulado. Pese a lo anterior, el confort térmico al interior de las viviendas siempre estuvo en alza, llegando a su peak el 2080. Es decir, el efecto del cambio climático sería un factor positivo para la sensación térmica del usuario al interior de la vivienda, considerando en épocas de verano el aumento de porcentaje de confort de 96% a 100% hacia el 2080 y en invierno en el mes más frío (Julio) de 0% a 16%.

En ámbitos normativos, según exigencias establecidas en el Código de Construcción Sustentable para Viviendas en la demanda de refrigeración en la zona F, se comprueba que las viviendas en estudio, considerando estrategias de mejoras pasiva, no cumplen con la norma.

Comparando el confort térmico del caso base (tipo A y B) para todos sus escenarios, con los resultados obtenidos de la aplicación de estrategias de mejoramiento, se identifica la relevancia de modificar elementos tales como tipo de vidrio o envolvente térmica, indicando un aumento en el porcentaje de confort tanto para invierno (mantenido el calor al interior) como para verano (controlando el ingreso de calor).

Analizando los casos base se demuestra en las viviendas actuales que, la demanda de refrigeración aumentaría en un 180% el año 2020 y en más de un 290% al 2050. Se deja en manifiesto la repercusión del alza en temperaturas exteriores. En términos de demanda de calefacción, (al igual que el confort) el cambio climático sería un factor positivo, ya que éste va en disminución con el transcurso de los años. En general, se puede concluir que, no todas las estrategias de mejora que se implementan son efectivas para todo tipo de vivienda; éstas no tienen que aislarse del contexto climático, deben adaptarse a él.

## Agradecimientos

El autor agradece al IPCC por la facilidad de la herramienta de generación de climas y a quienes fueron parte de la investigación y ayudaron en su buen desarrollo.

## Referencias

- IPCC. (2013). Climate change 2013: The physical science basis. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Isaac, M., & Van Vuuren, D. P. (2008). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.051>
- Jentsch, M. F., Bahaj, A. S., & James, P. A. B. (2008). Climate change future proofing of buildings-Generation and assessment of building simulation weather files. *Energy and Buildings*, 40(12), 2148–2168. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.005>
- Karimpour, M., Belusko, M., Xing, K., Boland, J., & Bruno, F. (2015). Impact of climate change on the design of energy efficient residential building envelopes. *Energy & Buildings*, 87, 142–154. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.064>
- Kwok, A. G., & Rajkovich, N. B. (2010). Addressing climate change in comfort standards. *Building and Environment*, 45, 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.005>
- Ministerio de vivienda y urbanismo, C. (2014). Código de Construcción Sustentable para Viviendas, Chile, 80. Retrieved from <http://www.sistema-construccion-sustentable.cl/Código-de-Construcción-Sustentable-Primera-Versión-español.pdf>
- Ren, Z., Chen, Z., & Wang, X. (2011). Climate change adaptation pathways for Australian residential buildings. *Building and Environment*, 46, 2398–2412. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.022>
- Shourav, M. S. A., Shahid, S., Singh, B., Mohsenipour, M., Chung, E.-S., & Wang, X.-J. (2017). Potential Impact of Climate Change on Residential Energy Consumption in Dhaka City. *Environmental Modeling and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10666-017-9571-5>
- Yau, Y. H., & Hasbi, S. (2017). A Comprehensive Case Study of Climate Change Impacts on the Cooling Load in an Air-Conditioned Office Building in Malaysia. *Energy Procedia*, 143, 295–300. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.687>



# Evaluación de la calidad acústica de aulas escolares en establecimientos educacionales municipales

Evaluation of the acoustic quality of classrooms in public schools.

## Guiselle Estefanía Arroyo Navarro

Filiación: Universidad del Bío-Bío  
Dirección: Collao #1202, Concepción CP 4051381  
Correo: guiselle.arroyo1601@alumnos.ubiobio.cl

## Paulina Wegertseder Martínez

Filiación: Universidad del Bío-Bío  
Dirección: Collao #1202, Concepción CP 4051381  
Correo: pwegertseder@ubiobio.cl

**Manuscript Code:** 010

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

### Resumen

Esta investigación evalúa la calidad acústica de cuatro aulas escolares ubicadas en Temuco (Chile) con el mismo sistema constructivo y entorno de ruido ambiental. Tres aulas tienen vidrio simple, diferentes alturas y terminaciones interiores, la otra tiene doble vidrio hermético (DVH) y tratamiento acústico. La calidad acústica se analizó con mediciones in-situ y encuestas basadas en el tiempo de reverberación (RT), inteligibilidad de la palabra (STI), porcentaje de pérdida de la consonante (%Alcons) y ruido de fondo ( $L_{eq}$ ). Las mediciones in-situ se guiaron a través del estándar internacional ISO-3382, utilizando el aula en estado desocupado. Los resultados fueron comparados con los estándares nacionales Términos de Referencia estandarizados (TDRe) e internacionales DB-HR Código Técnico de la Edificación de España (CTE), Instituto de estándar nacional de Estados Unidos (ANSI) y el Boletín de la construcción 93 de Reino Unido (BB93) los que muestran una mala calidad acústica para los 3 primeros casos y buena para el último. Esto contribuye a mejorar la calidad acústica de las aulas a través del uso y distribución de materiales adecuados.

**Palabras claves:** Calidad Acústica; Aulas escolares; Medición in-situ.

### Abstract

This research evaluates the acoustic quality of four classrooms located in Temuco (Chile) with the same constructive system and environmental noise. Three classrooms have single pane glass and different interior heights and surfacing materials. The other one has double pane glass and acoustic treatment. The acoustic quality was analyzed via on-site measurements and questionnaires based on the reverberation time (RT) speech intelligibility (STI) loss of consonant (%Alcons) and background noise ( $L_{eq}$ ). The on-site measurement was guided by the international standard ISO-3382 using an unoccupied classroom. Results have been compared with the national standards Terminos de referencia estandarizados (TDRe) and international DB-HR Código Tecnico de la Edificación from Spain (CTE) Acoustical National Standard Institute from USA (ANSI) and Building bulletin 93 from United Kingdom (BB93) that reveal poor acoustical quality for the first three cases and good for the last one. This contributes to improve the acoustic quality of the classrooms by correctly using the interior surfacing materials.

**Keywords:** Acoustic Quality; Classrooms; On-site measurement

## Introducción

In the last 10 years the noise level of Temuco has increased and public schools in Chile are not governed by an acoustic regulation that specifies the appropriate ranges for classroom acoustics. The classroom environmental conditions play crucial roles in health, performance and behavior of students (Vilcekova et al., 2017). When teachers communicate with or give instructions to the students in the classrooms, it is important that the messages can be passed effectively and clearly between them (Tang & Yeung, 2006). Among many aspects of interest for sustainability improvement in schools, acoustic comfort plays a primary role for students learning ability and teacher's health. Recently, research in the acoustic field was focused on listening quality and on noise effects in learning environments. A good acoustic environment is primarily achieved by the minimization of the contributions of noise from external and internal sources (Puglisi et al., 2015). The architectural factors and the constructive characteristics of the classrooms has an influence on the acoustic quality measured on the inside. The purpose is to diagnose the acoustic quality of four classrooms from different public schools according to the predominant constructive system in scenarios with similar environmental noise. One of them has acoustic treatment. Another focus was the evaluation of the student perception through questionnaires. The acoustical parameters like reverberation time, speech intelligibility, lost of consonant and background noise have been measured following the international standard ISO-3382 (ISO 3382-2, 2008)

## Estado del arte del problema

In order to achieve a good level of speech intelligibility, even in small classrooms, an accurate prediction of the reverberation time and speech level is necessary (Astolfi, Corrado, & Griginis, 2008). In practical terms, for school design, there is a need for guidance on considering the voice in classrooms, and whether passive room design can influence voice parameters (Durup Ab, Shield, Dance, Sullivan, & Gomez-Agustina, 2015). There are no substantial evaluations or improvement suggestions available now. One should not ignore the impact of the school environment on children, since they spend about one-third of their day at school. Their hearing, learning, and physical and mental health will be affected if they are in an inappropriate environment for a long time (Chiang & Lai, 2008). Reverberation time is a measure of the degree of reverberation in a space and is equal to the time required for a constant sound to decay into 60 dB after the sound source has ceased and is expressed in seconds (s). When the reverberation time has high values, it becomes difficult to distinguish sounds and understand speech because the syllables will overlap and interfere with intelligibility (Terra Vasconcelos Rabelo, Nunes Santos, & Cristina Oliveira, 2014). The results of Bradley tend to suggest that these indices are highly correlated with each other, implying that they are in principle equivalent for the purpose. The speech intelligibility is affected by the background noise, but the noise exposure of the children and teachers has been shown to have other additional impacts on the teaching and learning process (Tang, 2007). In practice and research the reverberation as an indicator of acoustic quality it is one of the most used to do measurements on-site and have an important impact in the acoustic comfort from the students and teachers.

## Metodología

### Case studies

This was a descriptive and experimental analysis through the on-site measurement. Four public schools were selected with the same constructive system and environmental noise but with different type of glazing and interior surfacing materials (Table 1).

**Table 6.** Classrooms features. Prepared by the author, 2018.

| CONSTANTS FACTORS   |                        | DYNAMIC FACTORS    |   |
|---------------------|------------------------|--------------------|---|
| ENVIRONMENTAL NOISE | 70 - 80 dB             | SURFACING MATERIAL | PLASTER BOARD - PAINTED SURFACE - WOODEN PLANKS                           |
| CONSTRUCTIVE SYSTEM | REINFORCED CONCRETE    | HEIGHT             | 3.2m - 2.8m - 3.07m - 3.25m   |
| TYPE OF GLAZING     | SINGLE PANE            | GLASS AREA         | 21m <sup>2</sup> - 14m <sup>2</sup> - 11m <sup>2</sup> - 16m <sup>2</sup> |
| AREA                | 45 - 55 m <sup>2</sup> |                    |   |

With the chosen factors was identified four representative classrooms, one of each school and they were named type A, B, C and D as follows on table 2 with associated constructive characteristics. The classrooms were chosen with the door in front of the hall and the windows in front an avenue with 70 – 80 dB of environmental noise.

**Table 7.** Schools: Case studies. Prepared by the author, 2018.

| TYPE     | SCHOOL       | CONSTRUCTIVE SYSTEM | ABSORBENT SURFACE     | AREA                | HEIGHT | GLASS AREA          | TYPE OF GLASS | SURFACING MATERIAL   |              |         |
|----------|--------------|---------------------|-----------------------|---------------------|--------|---------------------|---------------|----------------------|--------------|---------|
|          |              |                     |                       |                     |        |                     |               | WALLS                | CEILING      | FLOOR   |
| <b>A</b> | ANDRES BELLO | REINFORCED CONCRETE | 191.17 m <sup>2</sup> | 51.9 m <sup>2</sup> | 3.2 m  | 21.1 m <sup>2</sup> | SINGLE PANE   | WOODEN PLANK         | WOODEN PLANK | PARQUET |
| <b>B</b> | LOS TRIGALES | REINFORCED CONCRETE | 194.27 m <sup>2</sup> | 51.7 m <sup>2</sup> | 3.1 m  | 14.7 m <sup>2</sup> | SINGLE PANE   | PLASTERBOARD         | PLASTERBOARD | VINYL   |
| <b>C</b> | MILLARAY     | REINFORCED CONCRETE | 173.36 m <sup>2</sup> | 46.6 m <sup>2</sup> | 2.9 m  | 11.3 m <sup>2</sup> | SINGLE PANE   | PLASTERBOARD/POLIGYP | PLASTERBOARD | VINYL   |
| <b>D</b> | PABLO NERUDA | REINFORCED CONCRETE | 187.83 m <sup>2</sup> | 48.8 m <sup>2</sup> | 3.2 m  | 16.4 m <sup>2</sup> | DOUBLE PANE   | ACOUSTIC TREATMENT   | PLASTERBOARD | VINYL   |

### Acoustical measurement

The acoustic quality of the classrooms was evaluated with measurement of acoustic parameters such as reverberation time, speech intelligibility, lost of consonant and background noise. A long reverberation time is inappropriate for places such as classrooms, because the reflected sound will remain a form of reverberation longer than ideal, interfering with the direct sound and reducing intelligibility. Also, it will cause unwanted sounds, such as dragging of chairs and foot movements, which will also remain longer in the room, increasing noise levels (Terra Vasconcelos Rabelo et al., 2014).. The reverberation time was evaluated using the impulsive noise method by popping balloons in

six different combinations between microphone and source, according to the method impulse response from ISO 3382. An omnidirectional microphone model C03 multi-pattern was used in the field at a height of 1 meter from the floor. The balloon was popped at 1.5 meter simulating the height of the teacher's mouth. The results were analyzed by the Audio Real Time Analysis (ARTA) software. The reverberation time values were obtained for each frequency but the result is a single value from the arithmetic mean for the frequencies of 500, 1.000 and 2.000 Hz. The instruments used in the measurements had their calibration certificates. For the background noise a sonometer model 52 certificate: 10714.2 class 1 was used. The position of the balloons (G) and the microphones (M) are shown in Figure 1 to 8.

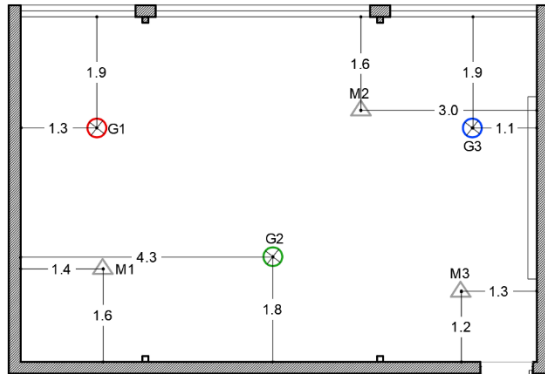


Figure 4. TYPE A. Source and microphone position. Prepared by the author, 2018.

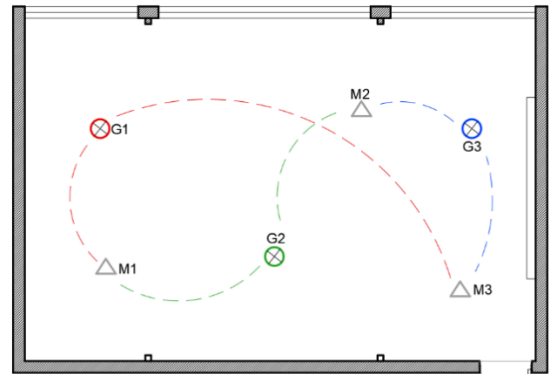


Figure 5. TYPE A. Source and microphone combination. Prepared by the author, 2018.

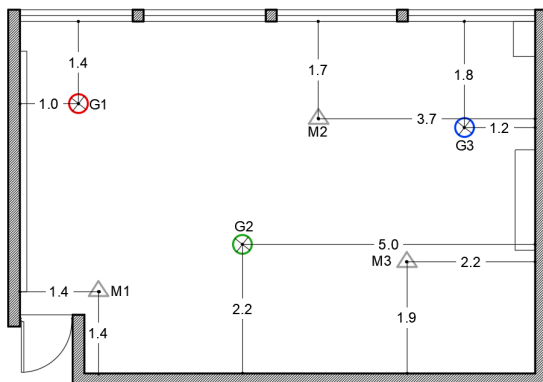


Figure 6. TYPE B. Source and microphone position. Prepared by the author, 2018.

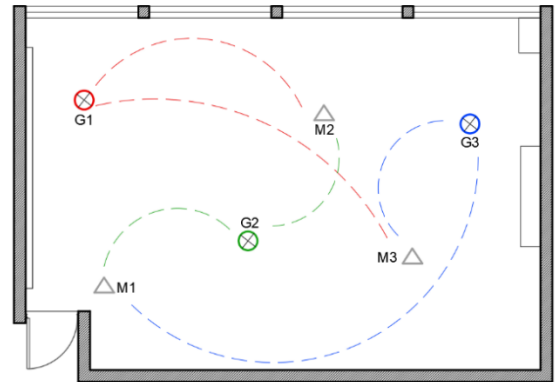


Figure 7. TYPE B. Source and microphone combination. Prepared by the author, 2018.

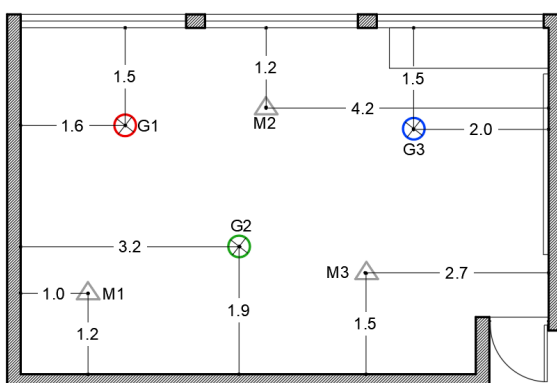


Figure 8. TYPE C. Source and microphone position. Prepared by the author, 2018.

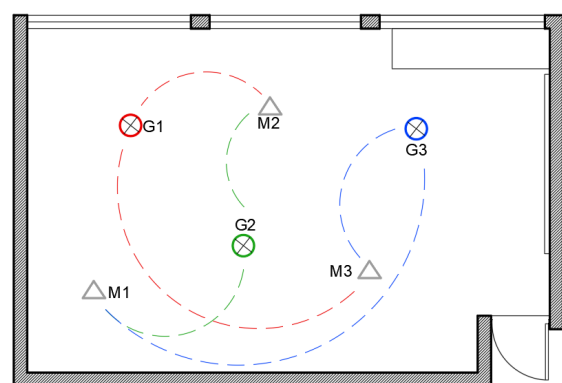


Figure 9. TYPE C. Source and microphone combination. Prepared by the author, 2018.



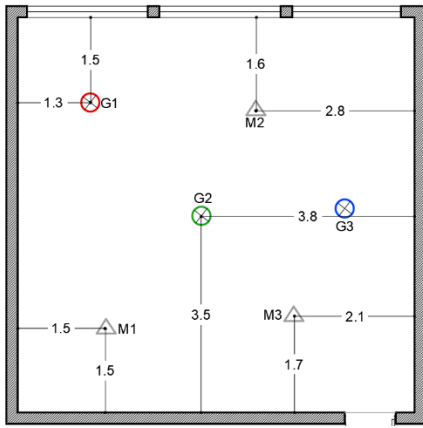


Figure 10. TYPE D. Source and microphone position. Prepared by the author, 2018.

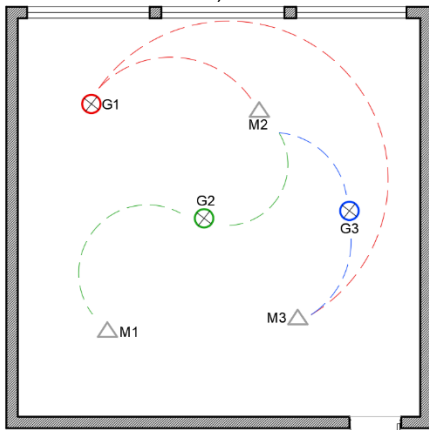


Figure 11. TYPE D. Source and microphone combination. Prepared by the author, 2018.

## Questionnaires

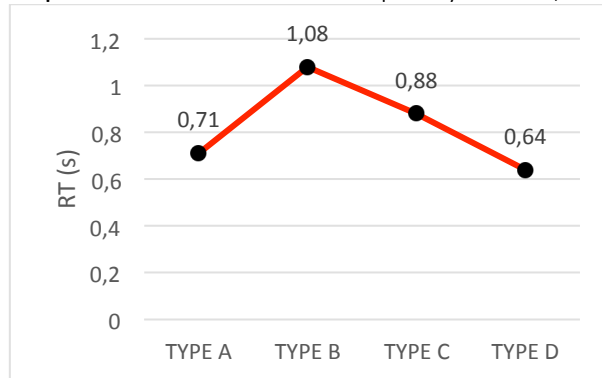
The student's perceptions were analyzed through questionnaires. The questions were related to influence of external noises, background noise in the classroom, the teacher's speech, the comfort percent and the clarity of the teacher's speech. The results obtained in the questionnaires complements the results on the on-site measurements and show the relation between these two parameters.

## Resultados

### Quantitative analysis: on-site measurement

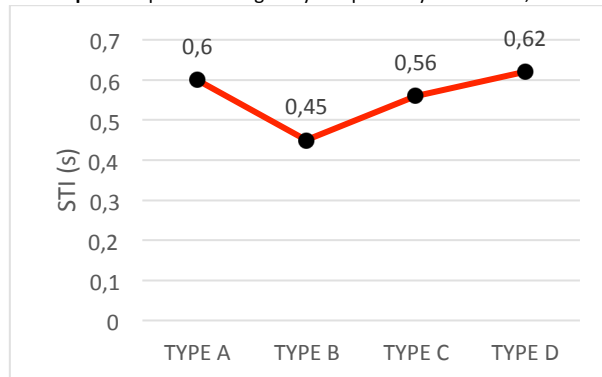
Results of the reverberation time (Graphic 1) in their different combinations for each classroom expected results according to the observation on-site where classroom type A has a better RT compared to type B and C considering that the surfacing materials are different. For type D that has acoustic treatment the results are accepted by the standards. The four types were compared with national and international standards as follow on Table 3.

**Graphic 5.** Reverberation time on-site. Prepared by the author, 2018.

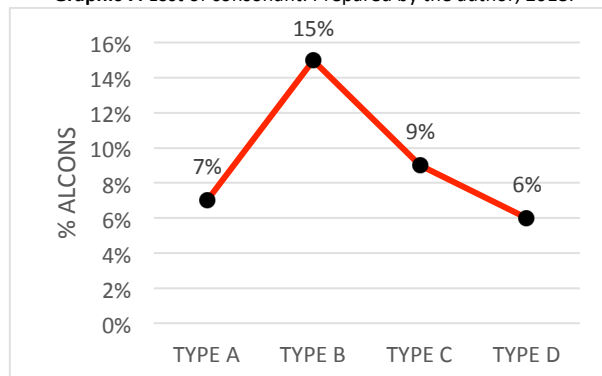


STI measurements (Graphic 2) and %Alcons (Graphic 3) was analyzed through the results of the reverberation time with ARTA software that shows results according to the impulse noise measured on-site. The values do not exceed the standards TDRe, ANSI and BB93 for the types A and D. For type B and C, the results are in the recommendations specified by the ANSI standard only.

**Graphic 6.** Speech intelligibility. Prepared by the author, 2018.



**Graphic 7.** Lost of consonant. Prepared by the author, 2018.



For the background noise the results (Graphic 4) were measured with a soundemeter in six different positions. The value for each classroom is the mean for the results of the six measurements. The levels of ambient noise measured in the different classrooms were higher than recommended by the standards (Table 3).

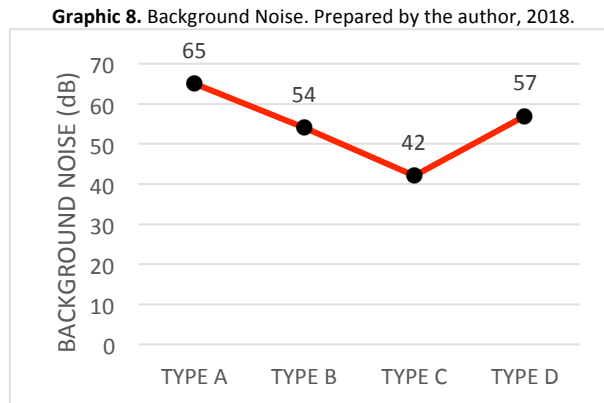


Table 3 shows the comparison between the on-site measurements results and the standards according to the quantitative analysis

**Table 8.** National and international standards. Prepared by the author, 2018.

| TYPE | RT   | TDR <sub>e</sub> | CTE | ANSI | BB93 | STI  | TDR <sub>e</sub> | CTE | ANSI | BB93 | L <sub>eq</sub> | TDR <sub>e</sub> | CTE | ANSI | BB93 |
|------|------|------------------|-----|------|------|------|------------------|-----|------|------|-----------------|------------------|-----|------|------|
| A    | 0.71 | X                | X   | X    | ✓    | 0.60 | ✓                | /   | ✓    | ✓    | 46.5            | /                | /   | X    | X    |
| B    | 1.08 | X                | X   | X    | X    | 0.45 | X                | /   | ✓    | X    | 43.3            | /                | /   | X    | X    |
| C    | 0.88 | X                | X   | X    | X    | 0.56 | X                | /   | ✓    | X    | 39.7            | /                | /   | X    | X    |
| D    | 0.64 | ✓                | ✓   | ✓    | ✓    | 0.62 | ✓                | /   | ✓    | ✓    | 40.7            | /                | /   | X    | X    |

Qualitative analysis: questionnaires

In the questionnaires the parameters associated with classroom acoustic quality were evaluated with the results from the measurements made on-site. In the type A and D, the comfort percent is higher showing that those who have the RT between ranges that the standards recommend, have a better acoustic quality. In type B and C, the percent of clear hearing is lower and is related to the STI and the RT who are below the standars. The tendencies are shown on Table 4.

**Table 9.** Qualitative analysis: Tendencies. Prepared by the author, 2018.

| TYPE | CLASSROOM NOISE | TEACHER'S SPEECH | ENVIRONMENTAL NOISE |      | HEARS AN ECHO |
|------|-----------------|------------------|---------------------|------|---------------|
|      |                 |                  | AVENUE              | HALL |               |
|      | % COMFORT       | % CLEAR HEARING  | % COMFORT           |      | % AFFIRMATION |
| A    | 83%             | 80%              | 51%                 | 74%  | 34%           |
| B    | 45%             | 51%              | 56%                 | 85%  | 79%           |
| C    | 46%             | 65%              | 58%                 | 71%  | 61%           |
| D    | 90%             | 84%              | 88%                 | 51%  | 27%           |

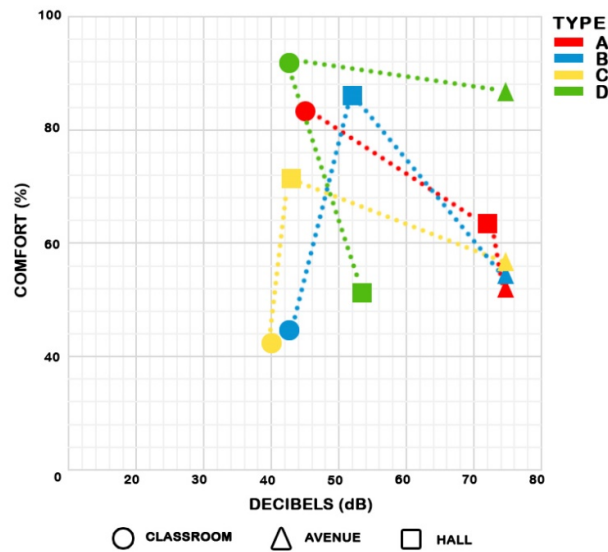
Comparison between quantitative and qualitative analysis

In general, it was observed that the acoustic quality of classrooms according to the perception of the students is connected to the clarity of hearing from the teacher's speech and when the environmental noise from the outside does not affect them. Comparing with the on-site measurements the results shows that type A and D are closer to the

standards recommendations demonstrating the connexion with the percent of comfort from the students and the levels of discomfort from the environmental noise.

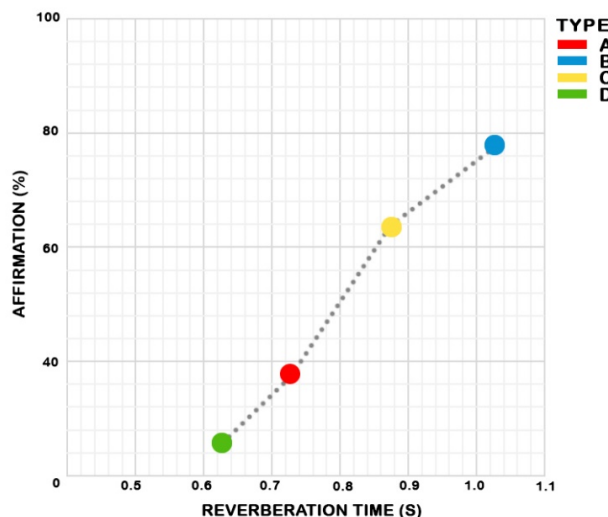
Comparing the results of Table 3 and 4, the background noise of the classroom, the hall and the exterior is related to the percentage of acoustic comfort that the student has with the noise on the inside, the avenue and the hall. Type A has a background noise of 47 dB and 83% of comfort, this decreases when the noise comes from the hall considering the 65 dB and the single pane glass on that side of the classroom. Type B has a background noise of 43 dB and 45% of comfort, this increases to 85% when the noise comes from the hall because that side of the classroom does not have windows. Type C has a background noise of 40 dB and 46% of comfort. Type D has background noise of 41 dB and 90% of comfort, indicating that the classroom has good acoustic quality according to the results of both measurements. This combination of variables is shown in Graphic 5.

Graphic 9. Background noise and comfort. Prepared by the author, 2018.



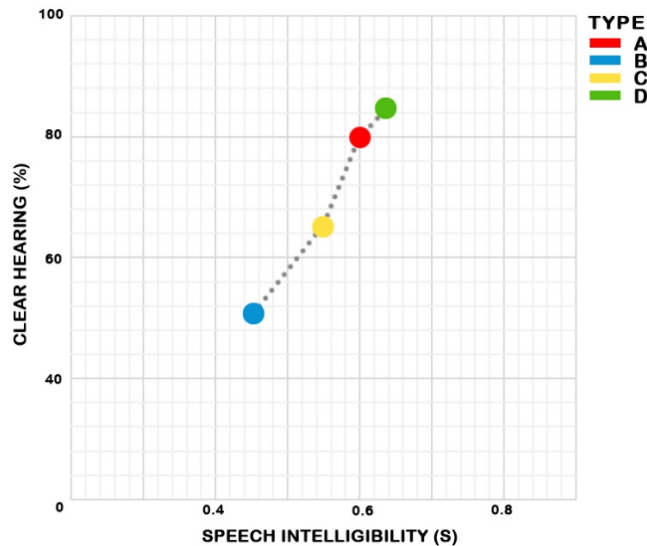
In Graphic 6, results of the qualitative analysis are shown as the percentage of affirmation of the students in listening to an echo in the classroom, this was compared with the RT measured on-site. The optimum reverberation time for a classroom is 0.6 s. Type D has RT 0.64 s that despite being on the recommendations suggested by the standards, only 34% of the students consider that there is an echo in the classroom. In type B, the reverberation time is 1.08 s, wich is above the recommended standards and is complemented by 79% of the students that declare to hear an echo.

Graphic 10. Reverberation time and echo affirmation. Prepared by the author, 2018.



In Graphic 7 the STI is shown that type A and D has a major percentage of clear hearing and a value of 0.60 s and 0.62 s that are within the ranges established by TDRe, ANSI and BB93. This is associated with the surfacing materials of the classrooms and the acoustic conditions.

**Graphic 11.** Speech intelligibility and clear hearing. Prepared by the author, 2018.



## Discusión y Conclusiones

From the obtained results in the two types of measurements, poor acoustical quality was revealed on the analysis of reverberation time, speech intelligibility, loss of consonant and background noise. The influence of the environmental noise is critical when the classrooms has single pane glass. The reverberation time is better when the surfacing materials of the walls has a better acoustic quality such as wood. Although the background noise found in classrooms was higher than the maximum level recommended by the standards TDRe, ANSI, CTE and BB93. The STI is related to the RT, if the RT is 0.6 or less and the STI is higher than 0.6 s, a better acoustic quality is obtained.

The measured classrooms do not provide an environment of quality for students, the acoustic signal must be transformed into a clear message.

A different situation happens when the classroom has an acoustic treatment, the results of the quantitative and qualitative analysis show the importance of considering the acoustic quality in the design stage. Thus, it recommends on existing classrooms to change the single pane glass for double pane glass, use wooden planks instead of plasterboard in all surfaces, avoid windows in walls that facing halls.

It is expected that further studies can do a simulation with acoustic softwares from this data and recommendations to keep improving the acoustic quality of the classrooms.

## Agradecimientos

The author would like to thank the students and the schools administrators for their generous assistance and all the people involved in this study.

## Referencias

- Astolfi, A., Corrado, V., & Griginis, A. (2008). Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.08.001>
- Chiang, C.-M., & Lai, C.-M. (2008). Acoustical environment evaluation of Joint Classrooms for elementary schools in Taiwan. *Building and Environment*, 43, 1619–1632. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.014>
- Citec UBB. (2015). *Términos de referencia estandarizados (TDRe)*, 2.
- Daniels, R., Freemantle, A., Mukund, P. (2014). *Building Bulletin 93. ACOUSTIC DESIGN OF SCHOOLS*. Retrieved from [http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20130402164558/https://www.education.gov.uk/publications/eOrderingDownload/BB93-Acoustic\\_Design.pdf](http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20130402164558/https://www.education.gov.uk/publications/eOrderingDownload/BB93-Acoustic_Design.pdf)
- Durup Ab, N., Shield, B., Dance, S., Sullivan, R., & Gomez-Agustina, L. (2015). How classroom acoustics affect the vocal load of teachers. *Energy Procedia*, 78, 3084–3089. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.761>
- Fomento, M. De, & Decreto, R. (2010). *Código Técnico Español. documento Básico HR: Protección frente al ruido*, 2010.
- ISO 3382-2. (2008). *Incorporating corrigendum Acoustics-Measurement of room acoustic parameters- Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*, 2009, 2008–2009.
- Puglisi, G. E., Cantor Cutiva, L. C., Pavese, L., Castellana, A., Bona, M., Fasolis, S., ... Astolfi, A. (2015). Acoustic comfort in high-school classrooms for students and teachers. *Energy Procedia*, 78, 3096–3101. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.763>
- Standard, A. N. (2009). *Acoustical performance criteria, design requirements and guidelines for schools, part 2*.
- Tang, S. K. (2007). Speech related acoustical parameters in classrooms and their relationships. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.08.008>
- Tang, S. K., & Yeung, M. H. (2006). Reverberation times and speech transmission indices in classrooms. *JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION*, 294, 596–607. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.11.027>
- Terra Vasconcelos Rabelo, A., Nunes Santos, J., & Cristina Oliveira, R. (2014). Effect of classroom acoustics on the speech intelligibility of students. *CoDAS*, 2626(55), 360–6360. <https://doi.org/10.1590/2317-1782/20142014026>
- Vilcekova, S., Meciariova, L., Burdova, E. K., Katunska, J., Kosicanova, D., & Doroudiani, S. (2017). Indoor environmental quality of classrooms and occupants' comfort in a special education



# Validación de modelo microclimático calculado con ENVI-met como herramienta para el análisis térmico edificio de EnergyPlus.

## Validation of microclimatic model calculated with ENVI-met as a tool for thermal building analysis of EnergyPlus.

### Julieta Balter

Filiación: Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Cuyo

Dirección: Centro Universitario, Parque General San Martín s/n, Mendoza (CP 5500), Argentina

Correo: [julietabalter@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:julietabalter@mendoza-conicet.gob.ar)

### Noelia Alchapar

Filiación: Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) del Centro Científico Tecnológico Mendoza, CONICET

Dirección: Av. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín, Mendoza (CP 5500), Argentina

Correo: [nalchapar@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:nalchapar@mendoza-conicet.gob.ar)

### Érica Correa

Filiación: Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) del Centro Científico Tecnológico Mendoza, CONICET

Dirección: Av. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín, Mendoza (CP 5500), Argentina

Correo: [ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar)

### Carolina Ganem

Filiación: Universidad Nacional de Cuyo - Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) del Centro Científico Tecnológico Mendoza, CONICET

Dirección: Av. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín, Mendoza (CP 5500), Argentina

Correo: [cganem@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:cganem@mendoza-conicet.gob.ar)

**Manuscript Code:** 014

**Date of Acceptance/Reception:** 27-09-2018/24-08-2018

### Resumen

El microclima alrededor de un edificio, establecido por la interacción con su entorno, es uno de los factores determinantes en el comportamiento termo-energético edilicio. La presente investigación propone desarrollar un método de integración de dos programas de simulación, uno a escala edilicia -EnergyPlus- y otro a escala urbana -ENVI-met-, con el objetivo de determinar la potencialidad predictiva del modelo de simulación urbano para crear datos microclimáticos fiables para conformar las bases climáticas del software EnergyPlus. El análisis se llevó a cabo en la zona con mayor concentración de densidad del área metropolitana de la ciudad de Mendoza y se tomó como caso de estudio un edificio másico de altura media. La investigación se divide en las siguientes etapas: (i) descripción de área urbana; (ii) diseño y validación del modelo numérico urbano (ENVI-met) y edilicio (EnergyPlus); (iii) ingreso de variables climáticas -monitoreadas versus calculadas- para un día de diseño en el programa EnergyPlus y según nivel de altura de departamento; (iv) contrastación de los resultados termo-energéticos interiores. Los resultados de la presente investigación revelan las capacidades y ventajas de trabajar con ENVI-met como herramienta para la generación de datos climáticos. El alto grado de ajuste -R<sup>2</sup> superiores a 0.94- de la temperatura del aire interior monitoreada y ajustada con EnergyPlus versus la utilizada con los datos microclimáticos calculados con el simulador urbano ENVI-met, apoya la fiabilidad de los resultados predictivos del método de integración de ambos softwares.

**Palabras claves:** EnergyPlus; ENVI-met; Validación de modelos climáticos; Simulación integrada

### Abstract

The microclimate around a building, established by the interaction with its environment, is one of the determining factors in the building thermo-energetic behavior of a building. The present investigation proposes to develop a method of integration of two simulation programs, one at building scale -EnergyPlus- and another at urban scale -ENVI-met-. The objective consists in determining the predictive potential of the urban model to create reliable microclimatic data to conform the climatic bases of the EnergyPlus software. The analysis was carried out in the area with the highest concentration of density in the metropolitan area of Mendoza city and a medium-height mass building was taken as case studied. The investigation is divided into the following stages: (i) description of urban area; (ii) design and validation of the urban numerical model (ENVI-met) and building (EnergyPlus); (iii) input of climatic variables -monitored versus calculated- for a design day in the EnergyPlus program and according to department height level; (iv) comparison of the interior thermo-energetic results. The results of this research reveal the capabilities and advantages of working with ENVI-met as a tool for the generation of climate data. The high degree of adjustment -R<sup>2</sup> above 0.94- of the indoor air temperature monitored and adjusted with EnergyPlus versus that used with the microclimatic data calculated with the urban simulator ENVI-met, supports the reliability of the predictive results of the integration method of both softwares.

**Keywords:** EnergyPlus; ENVI-met; Validation of climate models; Integrated simulation

Las áreas urbanas son responsables del 75% del consumo mundial de recursos (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), y dentro de ellas el sector edificio cumple un rol fundamental en el balance energético global. Si consideramos el sector residencial, éste resulta el más ineficiente en cuanto al incremento en sus consumos de gas natural y electricidad, representando a fines del 2010 el 91% del total del consumo del sector (Secretaría de Energía, 2014). En este sentido, el micro-clima alrededor de un edificio, establecido por la interacción morfológica y ambiental con su entorno urbano, se conforma como un factor determinante en el comportamiento termo-energético edilicio.

La ciudad de Mendoza, Argentina se concibe como una ciudad-oasis (Bórmida, 1984) debido a su intensa forestación urbana inscrita en una zona árida templada continental. La ciudad define desde el punto de vista ambiental dos estratos en altura dados por dicha forestación: con y sin arbolado. En este contexto los espacios interiores ubicados hasta el tercer nivel -bajo la copa de los árboles- cuentan con una situación micro-climática moderada y se ven beneficiados térmica y energéticamente tanto en invierno como en verano. Sin embargo, en los espacios de los niveles superiores -sobre la copa de los árboles- la situación es más extrema y los consumos para climatización son mayores en ambas estaciones debido a la exposición completa de sus envolventes (Balter, 2015). En este contexto, el comportamiento térmico interior y los consumos energéticos de cada unidad de vivienda ubicada en los edificios en altura se encuentran afectados de acuerdo al proceso de intercambio de energías entre la envolvente edilicia y el ambiente circundante. Para estudiar el desempeño edilicio según tal diferenciación en altura, el monitoreo de la situación ambiental *in situ* -tanto interior como exterior- presenta un gran valor dada la particular estructura de ciudad-oasis. No obstante, para realizar mediciones exhaustivas en este entorno urbano es preciso contar con un instrumental específico para cada estrato, lo cual muchas veces dificulta el monitoreo debido a la gran cantidad de variables meteorológicas demandadas. Al respecto, los modelos teóricos de simulación microclimática urbana son una herramienta adecuada y necesaria para poder no sólo diagnosticar el comportamiento termo-ambiental de una zona exterior, sino también para predecir el comportamiento edilicio inserto en una determinada configuración urbana existente o escenario propuesto.

El objetivo de la presente investigación es evaluar la potencialidad predictiva del software microclimático ENVI-met V.3.1 para proveer los datos climáticos utilizados por el software EnergyPlus V.8.8.0 y así determinar el comportamiento termo-energético de dos unidades de vivienda (bajo y sobre la copa de los árboles) en un edificio en altura media en la ciudad de Mendoza. Para ello se contrastan los resultados del modelo edilicio corrido con EnergyPlus y ajustado con los datos microclimáticos registrados *in situ*, en contraposición a los resultados de otro modelo edilicio que introduce datos microclimáticos calculados por ENVI-met. Este trabajo busca avanzar en la integración de ambos softwares para mejorar la precisión de los modelos de simulación y la validez de sus predicciones bajo la influencia de distintos entornos urbanos, lo que finalmente servirá para generar directrices en nuevos desarrollos urbanísticos que promuevan el uso racional de la energía.

## Estado del arte del problema

A nivel internacional, las investigaciones realizadas respecto a la integración de programas de simulación dinámica (EnergyPlus - ENVI-met) pueden clasificarse de acuerdo al foco de estudio o bien, según a la metodología adoptada. El trabajo de Yang et al. (2012) plantea y desarrolla una metodología de simulación integrada basado en los programas ENVI-met y EnergyPlus a partir de establecer una correspondencia de las superficies de un edificio. El trabajo utiliza el programa Building Controls Virtual Test Bed (BCTVB) para desarrollar un módulo de acoplamiento con el fin de transferir los resultados de la simulación entre los dos programas. Otros trabajos, se enfocan en el efecto de la sombra de los árboles en el desempeño térmico edilicio: Morakinyo et al. (2016) trabaja mediante la comparación de dos edificios educativos similares de tres niveles; con y sin sombra de los árboles. A través de monitoreo de las condiciones microclimáticas exteriores y térmicas interiores *in situ*, se validó en una primera instancia el modelo urbano en ENVI-met y luego, los datos meteorológicos exteriores específicos se utilizaron para crear el objeto de "un día de diseño" y aplicarlo como condición de contorno para cada edificio en la simulación con Energy Plus. Los resultados del trabajo muestran el impacto de las sombras en el confort térmico local en un microclima cálido-húmedo y. En cuanto que en el estudio de Kuo-Tsang y Yi-Jhen (2017) se analiza el impacto de distintas tipologías de cañones urbanos en las demandas energéticas para enfriamiento en edificios. El estudio emplea los dos simuladores citados anteriormente a partir de datos de bases meteorológicas de un año típico para simular las condiciones microclimáticas de los cañones urbanos para las condiciones climáticas más cálidas del año. Los resultados indican que el ancho de las calles produce la máxima influencia en los consumos de energía en las construcciones, seguido de la orientación, la densidad y la vegetación. Asimismo, Pastore et al. (2017) estudian los efectos de la vegetación en el



confort térmico interior en un área urbana residencial, a partir de las siguientes etapas: a) simulación con ENVI-met de un área del barrio a fines de contar con las condiciones de contorno ante la ausencia de mediciones climáticas reales; b) con las variables climáticas obtenidas se simula el barrio a menor escala con diferentes escenarios de vegetación urbana; c) por último las variables climáticas de salida se utilizan para simular con EnergyPlus las temperaturas y las condiciones de confort interiores mediante la integración de la vegetación exterior y algunas estrategias de rehabilitación edilicia. Por otro lado, Schwede y Sheng (2017) analizan las demandas energéticas anuales para enfriamiento en edificios en su contexto urbano en 26 ciudades de China. El estudio aplica un algoritmo para traducir los datos climáticos (EPW) en bases de datos anuales para localizaciones y micro-climas específicos mediante la simulación con ENVI-met. Esta información se utiliza para simular las condiciones térmicas y las demandas de enfriamiento en edificios mediante el programa TRNSYS.

A escala regional, en el Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE-CONICET) se ha trabajado intensamente en el uso de simuladores como una herramienta predictiva de los comportamientos microclimáticos bajo diferentes configuraciones morfo-materiales (Sosa et al., 2018, Alchapar et al., 2017, Alchapar y Correa et al., 2016); así como también a escala edilicia (Mercado et al., 2018, Barea et al., 2016, Balter et al., 2016, Phillipín et al., 2013, Mercado et al., 2010). Sin embargo, hasta el momento no se registran trabajos que integren softwares en ambas escalas.

## Metodología

La investigación se divide en las siguientes etapas detalladas a continuación: (i) descripción de área urbana; (ii) diseño y validación del modelo microclimático urbano (ENVI-met) y edilicio (EnergyPlus); (iii) ingreso de variables climáticas -monitoreadas versus calculadas- para un día de diseño en el programa EnergyPlus y según nivel de altura de departamento; (iv) contrastación de los resultados termo-energéticos interiores. La Figura 1 muestra el esquema de la metodología empleada.

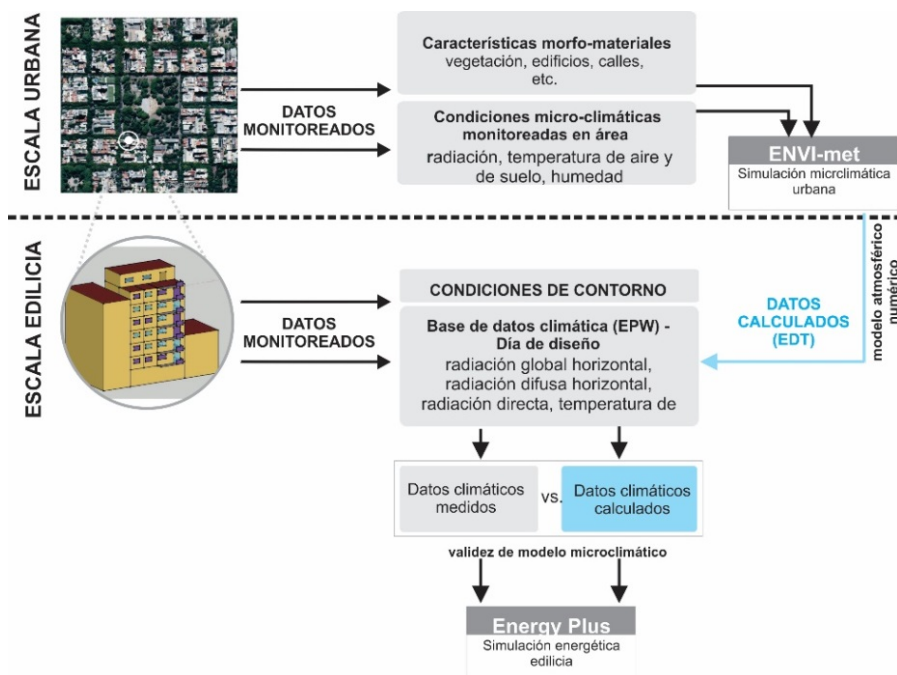


Figura 1. Esquema metodológico de la simulación termo-energética que integra el modelo numérico ENVI-met y EnergyPlus.  
Fuente: Elaboración propia; 2018.

### Descripción del área estudio

El análisis se llevó a cabo en el área metropolitana de Mendoza (AMM) con una superficie de 65 km<sup>2</sup>. Dicha zona es la de mayor densidad edilicia en altura, principalmente de uso residencial y con una densidad poblacional de más de 800 hab/ha. Esta zona presenta una geometría urbana abierta, conformada por canales viales anchos fuertemente arbolados y una estructura edilicia del tipo piramidal (Cantón, et al. 2004). La ciudad de Mendoza está situada al pie de la cordillera de los Andes, zona centro oeste de Argentina (32°40' latitud sur, 68°51' longitud oeste, y 750 m sobre el nivel del mar). Es un conglomerado urbano inserto en un clima continental semiárido con bajos porcentajes de humedad relativa atmosférica y alta heliofanía.

El área de estudio seleccionada abarca una cuadrícula de 7 x 7 hectáreas que suma una superficie total de 36 manzanas. Está conformada por las cinco plazas principales de la ciudad: Independencia, Chile, San Martín, España e Italia. Con respecto a la configuración material, los pavimentos vehiculares representan el 40 % del total de la envolvente urbana y los peatonales ocupan el 15 %, mientras que los techos representan el 22 %; el porcentaje restante corresponde a las superficies descubiertas -patios, plazas, jardines, etc.-Se releva un uso generalizado del pavimento peatonal tipo calcárea en diferentes colores: amarillo (31%), rojo (21%), negro (11%) y de cemento color gris (22%), entre otros, con un albedo medio de 0.3. Los materiales opacos superficiales que componen las fachadas del cañón urbano son predominantemente de piedra, ladrillo y/o pinturas. El albedo promedio de los materiales verticales es 0.2. El 80% de los techos son planos, construidos en hormigón armado y membranas o azotea accesible (albedo promedio=0.3). El 20% restante es inclinado y construido con tejas principalmente de cerámica (albedo promedio = 0.35) (Alchapar et al., 2014).

El 68% de los árboles plantados en alineación en la ciudad de Mendoza corresponden a tres especies: Morera (*Morus alba L.*) 38%; Plátano (*Platanus hispanica Tend.*) 21% Fresno europeo (*Fraxinus excelsior L.*) 19%. El 32% restante corresponde a: Fresno americano (*Fraxinus americana*), Acacia visco (*Acacia visco*), Paraíso común y paraíso sombrilla (*Melia azedarach*), Tipa (*Tipuana tipu*), Álamos (*Populus spp.*), Acer (*Acer negundo*) (Martínez et al., 2017). (Figura 2 y 3).

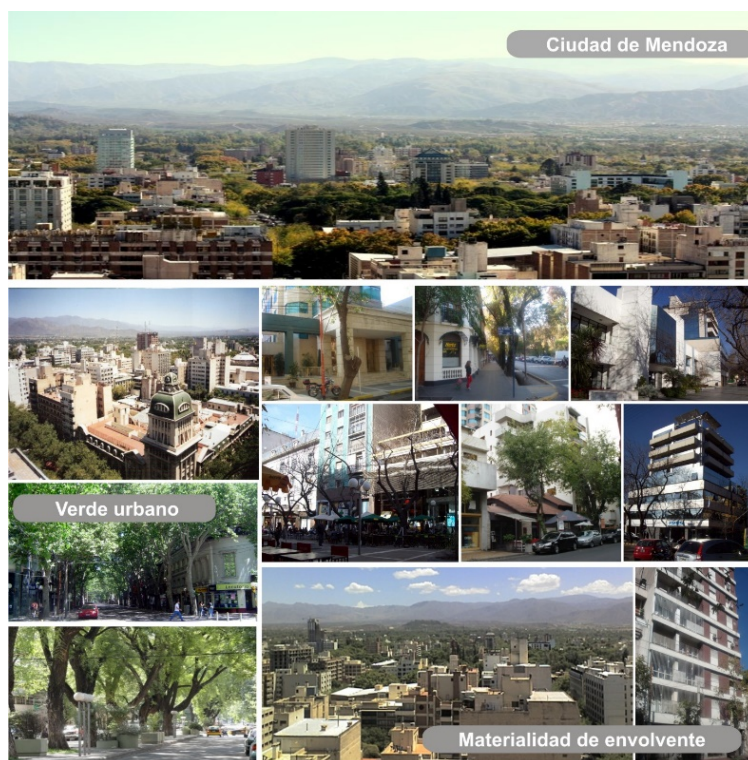


Figura 2. Área Metropolitana de Mendoza (AMM), Argentina. Características morfología, materiales y forestales de la ciudad estudiada. Fuente: Elaboración propia; 2015.

### Diseño y validación del modelo numérico a escala urbana. ENVI-met 3.1

Para realizar el diseño numérico se utilizó el programa de acceso gratuito ENVI-met 3.1, desarrollado por Michael Bruse en el Instituto de Geografía de la Universidad de Mainz, Alemania. Este modelo computacional tridimensional trabaja a escala de microclima urbano y simula las interacciones entre el aire y la superficie del entorno urbano con una resolución típica de 0.5 a 10 metros en el espacio y cada 10 segundos en tiempo. ENVI-met 3.1 está basado en las leyes fundamentales de la dinámica de flujos y la termodinámica. El modelo incluye la simulación de: flujos alrededor y entre edificios; procesos de intercambio de calor y vapor de las superficies de suelo y paredes; turbulencia; parámetros de la vegetación; bioclimatología; y dispersión de contaminantes (Bruse, 2006).

#### Variables de ingreso

Los datos de ingreso para la modelación numérica del área urbana evaluada se pueden dividir en tres grupos:

- *Diseño del espacio físico*: El modelo fue realizado en una versión 200 x 200 x 30. La resolución del área es de 3.5 x 3.5 x 3 m y malla de 197 (x); 197 (y), debido a que la superficie de referencia es de 690 x 690 m.
- *Variables climáticas*: El software ENVI-met 3.1 requiere del ingreso de variables no perturbadas que caracterizan las condiciones de borde de la simulación, tales como: (i) velocidad, dirección de viento (m/s) a 10 m de altura y rugosidad de suelo (z0) al punto de referencia; (ii) temperatura atmosférica inicial (K) y humedad específica (gr. agua/kg. aire) a 2500 m de altura. Los datos se obtuvieron del Aeropuerto Francisco Gabrielli -Estación n° 87418, Observatorio Aero de Mendoza – en colaboración con la Universidad de Wyoming; (iii) humedad relativa (%) a 2m de altura, registrada con sensor ONSET Weather, tipo HOBO H08-003-02 (punto fijo, para el ajuste).
- *Propiedades térmicas del modelo teórico urbano*: Para la caracterización de los edificios es necesario definir temperatura interior, transmitancia térmica y albedo de paredes, techos y pavimentos. Con el propósito de especificar el comportamiento del suelo, se debe precisar temperatura y humedad para distintas capas de suelo. En la Tabla 1 se listan las condiciones de simulación y las propiedades usadas en el trabajo.

Tabla 1. Parámetros de ingreso del simulador ENVI-met 3.1. Fuente: Elaboración propia; 2018.

| DATOS       |   |      |
|-------------|---|------|
| Principales | Velocidad de viento a 10 m [m/s]                        | 4    |
|             | Dirección de viento (0:N; 90:E;180:S; 270:W)            | 150  |
|             | Rugosidad (z0) al punto de referencia                   | 0.1* |
|             | Temperatura atmosférica inicial [K]                     | 297  |
|             | Humedad específica a 2.500m [g agua/kg aire]            | 3.5  |
| Edilicios   | Humedad Relativa a 2m [%]                               | 40.9 |
|             | Temperatura interior [K]                                | 295  |
|             | Transmitancia térmica paredes [W/m²K]                   | 2    |
|             | Transmitancia térmica techos [W/m²K]                    | 0.7  |
|             | Albedo de pared   | 0.2  |
| De Suelo    | Albedo de techo   | 0.3  |
|             | Temperatura Inicial de capa superior (0-20 cm) [K]      | 293  |
|             | Temperatura Inicial de capa media (20-50 cm) [K]        | 293  |
|             | Temperatura Inicial de capa profunda (más de 50 cm) [K] | 293  |
|             | Humedad Relativa de capa superior (0-20 cm) [%]         | 50*  |
|             | Humedad Relativa de capa media (20-50 cm) [%]           | 60*  |
|             | Humedad Relativa de capa profunda (más de 50 cm)        | 60*  |

Nota: Los parámetros con "\*"son valores por defecto de ENVI-met 3.1.

### Monitoreo y calibración

El 30 de marzo de 2013 fue seleccionado como día de ajuste. Esta fecha de referencia es coincidente con el monitoreo *in situ* realizado a escala edilicia (33.2 °C de temperatura máxima, 23.2 °C de temperatura mínima, 27.4 °C de temperatura promedio). Para calibrar el modelo numérico se contrastó la curva de temperatura del aire del área simulado con ENVI-met (Ps), con la curva temperatura del aire obtenida a partir de datos registrados en un punto fijo de referencia (Pf), ubicado dentro del canal vial analizado e indicado en la Figura 3.

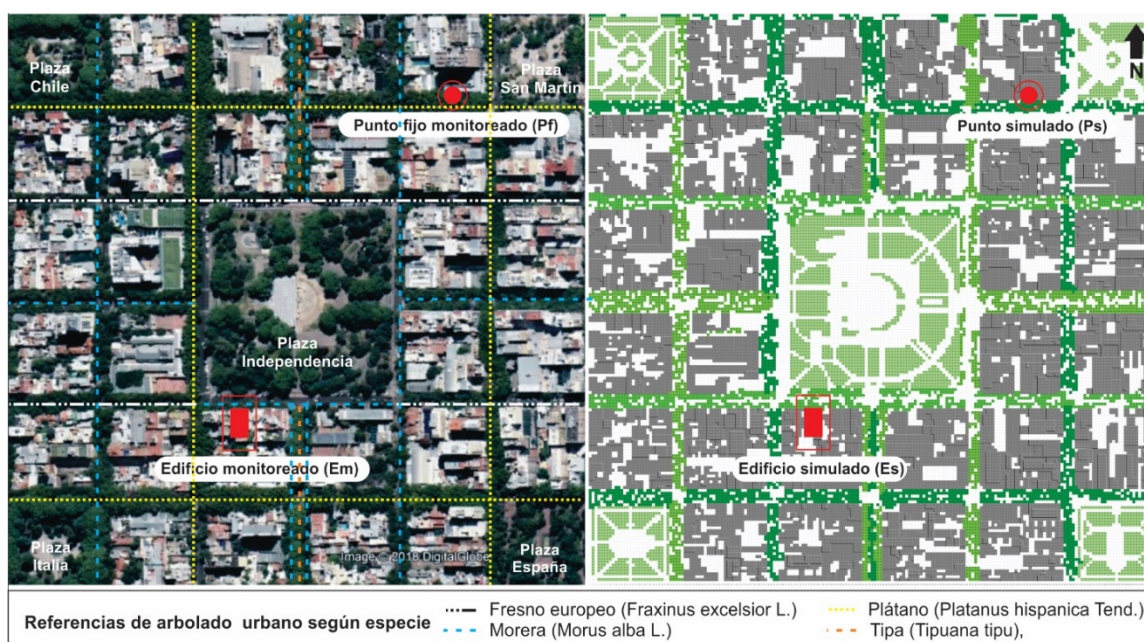


Figura 3. Vista aérea del área de estudio y configuración de modelo numérico con ENVI-met 3.1. Descripción del arbolado urbano. Ubicación de: puntos monitoreado (Pf) y simulado (Ps), y edificio monitoreado (Em) y simulado (Es). Fuente: Elaboración propia; 2018.

La Figura 4 grafica la curva de temperatura de aire medido (Pf) con la simulada (Ps) a una altura peatonal (2.5 m). Los estadísticos que caracterizan y comparan los datos muestran una buena predicción del comportamiento térmico del día evaluado, con un R2=0.88 y desviación estándar= 0.75.

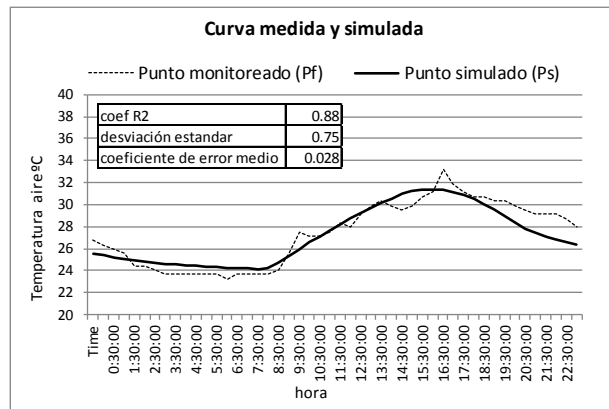


Figura 4. Gráfico de ajuste del punto simulado y monitoreado en el área urbana de estudio. Fuente: Elaboración propia; 2018.

### Diseño y validación del modelo numérico a escala edilicia -EnergyPlus V.8.8.0-

#### Descripción del edificio en estudio

El caso seleccionado es un edificio con orientación Norte correspondiente a la tipología de Torre sin retiros de las líneas divisorias de edificación. Dicha tipología corresponde a una de las tres existentes en Mendoza de acuerdo a la clasificación morfológica según las normativas edilicias en el momento de su construcción (Balter et al., 2013). Las unidades de vivienda monitoreadas son frontales, es decir, orientados a la vía pública y por ende a la arboleda urbana. Asimismo, para su selección se consideró pertinente, dado el contexto urbano que lo favorece, que la acera inmediata al Norte del edificio sea una plaza asegurando la ausencia de sombras por entorno (ver Figura 3).

En cuanto a la materialidad, es un edificio mayormente másico, con un 73% de materiales opacos en su envolvente expuesta. Los muros exteriores son de ladrillo cerámico hueco de 0.30m con revoque y pintura sin aislación y las divisiones interiores son del mismo material de 0.10 m de espesor. Los vidrios son simples de 4mm ( $K= 5.8W/m^2\text{°C}$ , factor solar = 0.87). Como elementos de protección solar el edificio cuenta con balcones de 1.20m de profundidad y persianas corredizas con celosías de madera color blanco.

Los departamentos a evaluar son dos unidades de vivienda equivalentes entre sí (superficie cubierta de 122 m<sup>2</sup>) ubicadas una en el primer nivel -bajo la copa de los árboles- y la otra en el quinto nivel -sobre la copa de los árboles-, indicadas en la planta y fachada de la Figura 5.

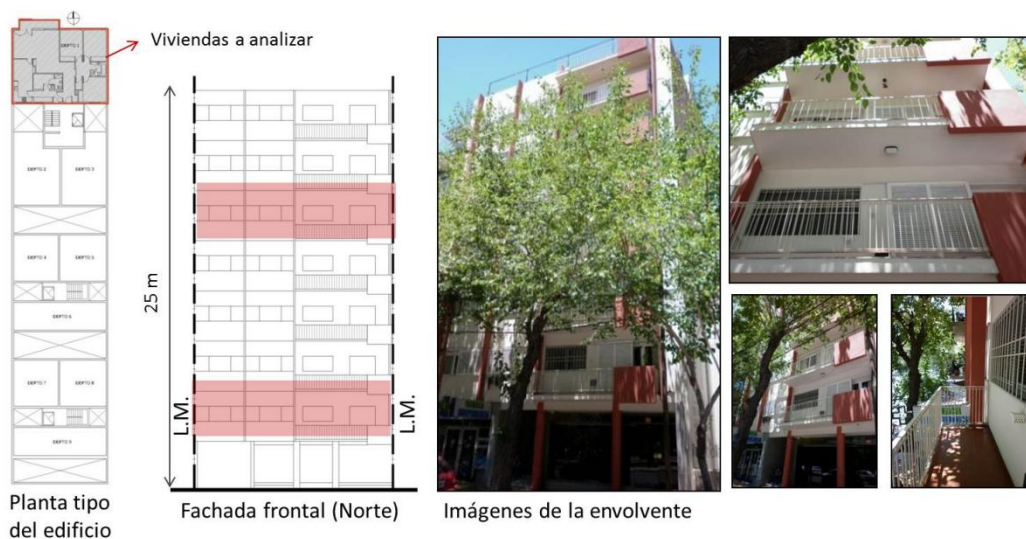


Figura 5. Planta tipo, fachada frontal e imágenes del edificio monitoreado. Fuente: Elaboración propia; 2015.

**Monitoreo y calibración**

Respecto a las mediciones higrotérmicas se realizaron auditorías in situ simultáneamente en las dos viviendas en un periodo comprendido entre el 28 de marzo al 12 de abril. Se utilizaron micro-adquisidores de datos HOBO U12 de temperatura y humedad relativa y se fijaron intervalos de registro cada 15 minutos sincrónicos en todos los instrumentos, criterio adoptado de acuerdo a las recomendaciones de Longobardi y Hancock (2000). Fueron instalados 3 micro-adquisidores para cada una de viviendas ubicados en diferentes ambientes: dos en el interior (estar y habitación) y uno en el exterior (balcón) protegido de la radiación solar. Los mismos se ubicaron a una altura media de 2 metros, siguiendo las recomendaciones de (Kolher y Hassler, 2002) y a una distancia suficiente de la masa de las paredes a los efectos de evitar distorsiones en los datos (Oke, 2004). Las mediciones de Radiación Global se realizaron con un Solarímetro CM 5 KIPP & ZONEN en los mismos periodos y con la misma frecuencia de toma de datos establecida para las mediciones de temperatura de aire y humedad relativa. Las mismas se efectuaron en el Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CCT Mendoza) el cual se ubica dentro de un radio de 2km, distancia apropiada para la validez de los datos (Grossi Gallegos, 2011). Las mediciones efectuadas fueron utilizadas para validar modelos de simulación dinámica mediante el programa Energy Plus, versión 7.0 (2009). Este programa gratuito fue desarrollado por el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) y es actualmente el software oficial para la simulación del Departamento de Energía de EE.UU. Para la simulación térmica de los espacios se tuvieron en cuenta los aspectos detallados en trabajos publicados (Balter et al, 2016). En la Tabla 2 se muestra la descripción de la materialidad opaca ingresada.

Tabla 2. Propiedades de los materiales ingresados en el modelo de Energy Plus. Fuente: Elaboración propia; 2015.

| Capas                    | Rugosidad       | Espesor [m] | Conductividad [W/m°C] | Densidad [Kg/m3] | Calor Especifico [J/Kg°C] |
|--------------------------|-----------------|-------------|-----------------------|------------------|---------------------------|
| <b>MUROS EXTERIORES</b>  |                 |             |                       |                  |                           |
| Revestimiento exterior   | Muy rugoso      | 0.025       | 0.93                  | 1900             | 1000                      |
| Ladrillo hueco           | Rugoso          | 0.3         | 0.41                  | 1200             | 600                       |
| Revestimiento interior   | Muy rugoso      | 0.025       | 0.93                  | 1900             | 1000                      |
| <b>MUROS INTERIORES</b>  |                 |             |                       |                  |                           |
| Revestimiento interior   | Muy rugoso      | 0.025       | 0.93                  | 1900             | 1000                      |
| Ladrillo hueco           | Rugoso          | 0.1         | 0.41                  | 1200             | 600                       |
| Revestimiento interior   | Muy rugoso      | 0.025       | 0.93                  | 1900             | 1000                      |
| <b>PISOS / CUBIERTAS</b> |                 |             |                       |                  |                           |
| Yeso                     | Suave           | 0.025       | 0.48                  | 741.3            | 836.3                     |
| Hormigón                 | Rugoso          | 0.12        | 1.7                   | 2400             | 800                       |
| Mortero cemento          | Rugosidad Media | 0.1         | 1.63                  | 2400             | 800                       |
| Parket de madera         | Suave           | 0.025       | 0.11                  | 500              | 2800                      |

La estación seleccionada para la validación fue el otoño, con el fin de considerar los periodos en los que no se utilizaron medios mecánicos de climatización y así aislar los aportes de calefacción o enfriamiento en el interior de los espacios. Esta situación se observó en los comportamientos térmicos de los espacios auditados y se corroboró en las entrevistas realizadas a los usuarios (Balter, 2015). Las simulaciones se programaron 10 días antes de la fecha seleccionada dado que resulta importante que el modelo físico entre en régimen con anticipación. Las calibraciones se realizaron en los estar por ser los espacios más ocupados y en los que se pudo saber con mayor detalle la influencia de los usuarios. En la Figura 6 se presentan las curvas del ajuste realizadas en el periodo del 6 al 11 de abril.

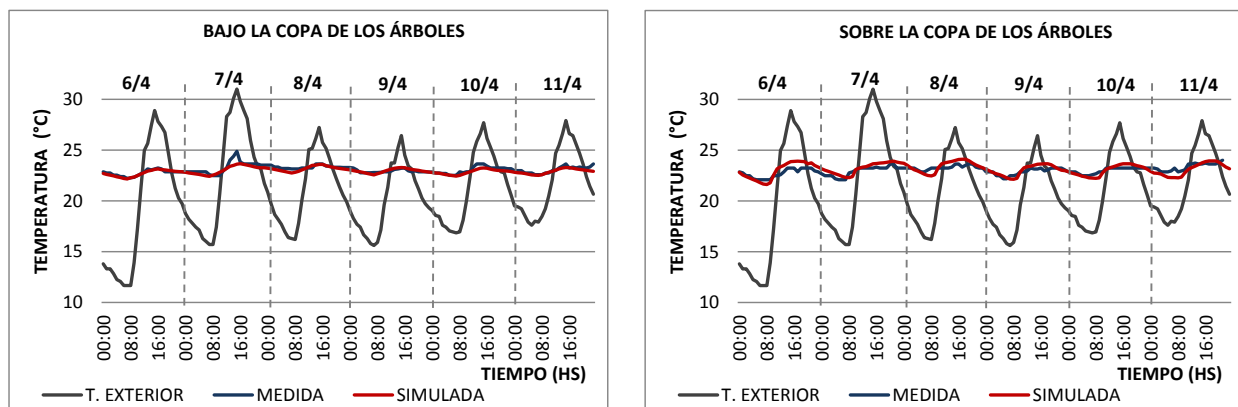


Figura 6. Ajuste de las mediciones en el modelo Energy Plus para las viviendas ubicadas bajo y sobre la copa de los árboles. Fuente: Elaboración propia; 2015.

### Ingreso de variables climáticas en EnergyPlus monitoreadas versus calculadas con ENVI-met

El software EnergyPlus cuenta con distintas formas de ingresar los datos climáticos. Para el ajuste del edificio en estudio en EnergyPlus se utilizó la variable de datos monitoreados (UseWeatherFile) determinando un período (RunPeriod). Asimismo, con el fin de obtener resultados de la condición microclimática dada bajo y sobre la copa de los árboles, las simulaciones térmicas en el interior se realizaron en las dos unidades de vivienda correspondientes al 1° y 5° nivel.

A partir de los datos microclimáticos calculados con ENVI-met se obtuvieron las condiciones de entorno para ingresar los datos en EnergyPlus. En cuanto a los flujos de radiación solar existen diferencias considerables entre los dos modelos debido a las disparidades entre los modelos físicos y los esquemas numéricos. Una de las principales diferencias tiene que ver con el efecto de sombreado de la vegetación: ENVI-met considera la vegetación como un medio turbulento y calcula su transmitancia como una función de la trayectoria óptica del haz solar a través de las hojas y el índice del área foliar; mientras que EnergyPlus la trata como elementos de sombra del contexto, con una transmitancia constante (Yang et al., 2012). En el presente trabajo, en función de comparar distintos objetos de entrada de datos climáticos se trabajó con un día coincidente de las mediciones edilicias y urbanas (30 de marzo) y se conformaron los siguientes archivos/objetos climáticos:

1. Ingreso de datos monitoreados en el período del 29 de marzo al 12 de abril: se conformó el archivo de clima (extensión EPW) con los datos requeridos: Radiación Global sobre superficie horizontal, Radiación difusa sobre superficie horizontal, Radiación directa normal al haz, Temperatura de bulbo seco exterior, Humedad relativa exterior, velocidad y dirección de vientos. En función de considerar las diferencias de radiación incidente en los dos niveles evaluados se realizan dos archivos climáticos: uno, para la condición dada sobre la copa de los árboles, que contiene las mediciones realizadas de temperaturas y radiación solar global. Y un segundo archivo climático, para el departamento bajo la copa de los árboles, en el cual se modifica la radiación incidente bajo la arboleda urbana de acuerdo a los estudios realizados sobre el grado de permeabilidad de árboles en ciudades del centro oeste de Argentina por Cantón et. al (1994). Dicha permeabilidad a la radiación global al mediodía solar correspondiente a la arboleda urbana existente en el caso de estudio (Morus Alba) es del 38.7% en otoño. Respecto a la velocidad del viento se ingresaron valores predominantes en Mendoza de acuerdo al Servicio Meteorológico Nacional.
2. Ingreso de datos calculados con ENVI-met para el día 30 de marzo: se conformó el archivo de clima (extensión EPW) con los datos requeridos descritos en el punto 1. En función de contemplar las diferencias bajo y sobre la copa de los árboles se realizaron dos archivos climáticos, ingresando los datos calculados por el simulador para una altura de 3 metros (1°er nivel) y de 15 metros (5° nivel). Se conformó el objeto de entrada "SizingPeriod:WeatherFileDays", en la cual se especifica un periodo del archivo de datos climáticos.
3. Día de diseño con datos calculados con ENVI-met: se conformó un día de diseño ingresando los datos manualmente para el 30 de Marzo con la opción "SizingPeriod:DesignDay", la cual describe días de diseño (similar a las condiciones de diseño de ASHRAE pero en un día completo) usando algunas características del día y EnergyPlus completa los cálculos faltantes (por ej., posición solar). Los datos ingresados necesarios se especifican en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos microclimáticos ingresados en EnergyPlus para un día de diseño. Fuente: Elaboración propia; 2018.

|   |          |
|---|----------|
| Temperatura de bulbo seco máxima          | 29.4 °C  |
| Rango diario de temperatura de bulbo seco | 7 °C     |
| Temperatura de rocío                      | 1.83 °C  |
| Presión barométrica                       | 91860 Pa |
| Velocidad de viento                       | 2.12 m/s |
| Dirección de viento                       | 124.6 °  |
| Índice de claridad de cielo               | 0.6      |

## Resultados

### Contrastación de temperaturas interiores

Se presentan los resultados de las cinco simulaciones realizadas -tres modelos simulados sobre la copa de los árboles y dos modelos simulados bajo la copa de los árboles-, de acuerdo a las tres conformaciones de ingreso de datos climáticos. El esquema puede verse en la Figura 7.

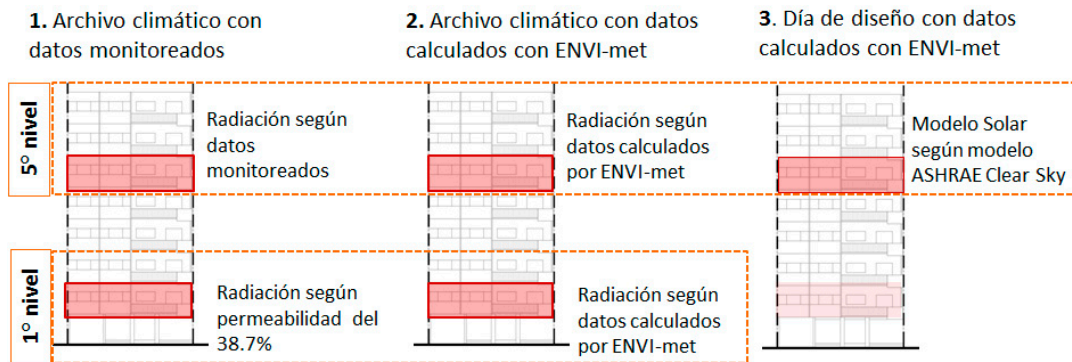


Figura 7. Esquema de ingreso de datos climáticos para cada nivel en altura evaluado. Fuente: Elaboración propia; 2018.

La Figura 8 grafica los resultados de las simulaciones del espacio interior evaluado (estar) para cada nivel en altura. Los resultados de los modelos simulados con datos monitoreados y datos calculados por ENVI-met muestran temperaturas interiores similares tanto bajo como sobre la copa de los árboles. En ambos casos la curva con datos monitoreados cuenta con mayor delta T: en el 1º nivel dicha diferencia ( $\Delta T$ ) es de 1.5°C con datos monitoreados y de 1.1°C con datos de ENVI-met; mientras que en el 5º nivel las diferencias son de 2.9°C con datos monitoreados, de 2.5°C de acuerdo al archivo climático con datos de ENVI-met y de 1.9°C con la opción del día de diseño. El aplanamiento de la curva de temperatura calculada con ENVI-met ocurre con mayor intensidad en las simulaciones de estaciones intermedias (otoño-primavera) e invierno, debido a que el ángulo solar es menor (Kántor et al., 2014).

Los valores dados en las temperaturas máximas resultan similares en todos los casos evaluados, con diferencias que pueden considerarse despreciables, menores a 0.2°C. Las mayores diferencias se encuentran en las temperaturas mínimas: en el primer nivel ésta es de 0.37°C; y en el quinto nivel la diferencia de los datos monitoreados respecto a los datos con ENVI-met es de 0.50°C, mientras que entre los datos monitoreados y el día de diseño resulta de 1.25°C.

La Figura 9 muestra la relación de temperaturas con datos monitoreados y datos de ENVI-met, en donde puede verse un grado de ajuste importante. Para el primer nivel el  $R^2$  es de 0.97; mientras que en el quinto nivel la relación entre los datos monitoreados y los datos con ENVI-met es de 0.98 y entre los datos monitoreados y los datos con un día de diseño el  $R^2$  es de 0.94.

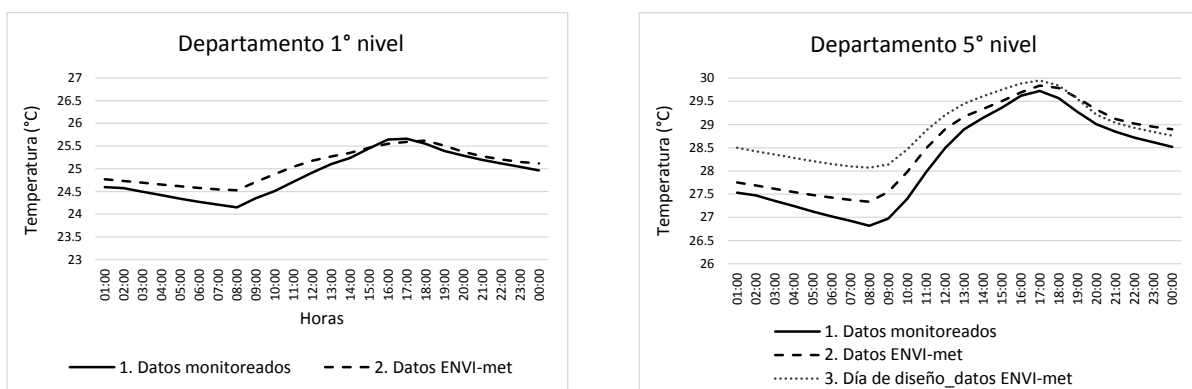


Figura 8. Temperaturas interiores con diferentes conformaciones de ingreso de datos climáticos para el 1º y 5º nivel. Fuente: Elaboración propia; 2018.

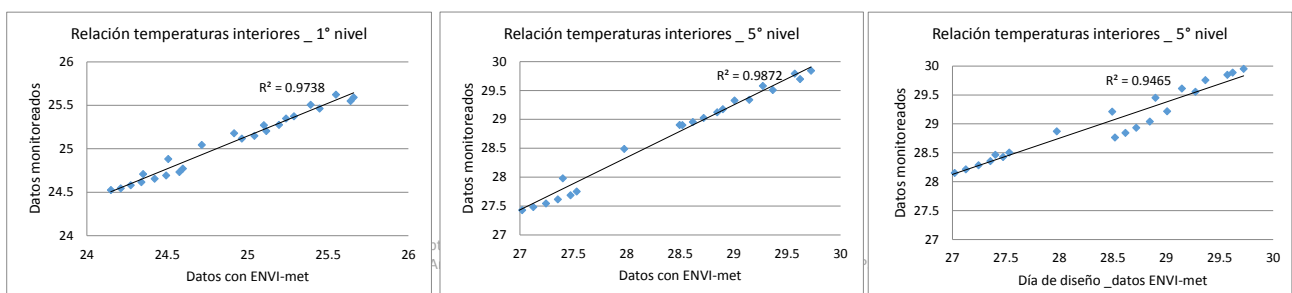


Figura 9. Relación de temperaturas interiores de acuerdo a los datos monitoreados y calculados por ENVI-met. Fuente: Elaboración propia; 2018.

## Discusión y Conclusiones

Los resultados de la presente investigación revelan las capacidades y ventajas de trabajar con ENVI-met como herramienta para la generación de datos climáticos que incorporan y reflejan la influencia del entorno urbano. El alto grado de ajuste  $-R^2$  superiores a 0.94- de la temperatura del aire interior monitoreada y ajustada con EnergyPlus versus la utilizada con los datos microclimáticos calculados con el simulador urbano ENVI-met, apoya la fiabilidad de los resultados predictivos del método de integración de ambos softwares.

Este trabajo abre distintas posibilidades de trabajos a futuro. Por un lado, la exploración de las variables climáticas utilizadas para el objeto de entrada del día de diseño (SizingPeriod: DesignDay), el cual si bien es óptimo para dimensionar sistemas y calcular cargas de calefacción/enfriamiento, puede presentar variaciones en relación a las condiciones reales del contexto. De acuerdo a lo descrito en el manual de EnergyPlus (EngineeringReference) la ecuación utilizada por el modelo de ASHRAE para cielo claro usualmente sobreestima la radiación que recibe el edificio debido a que no da el máximo valor de radiación normal directa que ocurrirá en el mes, sino un valor representativo en condiciones de cielo claro para una atmosfera relativamente seca y limpia. Para atmósferas muy claras, el valor puede ser hasta 15% mayor que el predicho por esta ecuación. Esto se corroboró en los resultados térmicos interiores del modelo que utilizó un día de diseño, en donde las temperaturas interiores son mayores.

Por otro lado, los resultados obtenidos muestran temperaturas mínimas interiores mayores con los datos calculados por ENVI-met, lo cual puede indicar que los cálculos del simulador urbano reflejan la dificultad del enfriamiento nocturno dado por el follaje arbóreo. Esto indica la potencialidad de explorar el efecto de sombreado de la vegetación con ENVI-met.

En trabajos futuros se prevé extender este método de simulación integrada a escenarios urbanos que modifiquen parámetros relacionados a la materialidad de la envolvente, la morfología edilicia, densidad, porcentaje de vegetación en canales viales, etc. Este conocimiento generado brindará directrices para la planificación urbano/ambiental en pos de alcanzar pautas de diseño en base a configuraciones urbanas que alcancen mejoras en el consumo energético edilicio para ciudades de clima árido.

## Agradecimientos

- PICT 2017-3248: Valoración Energética y Ambiental de los Espacios Urbanos en Ciudades de Zonas Áridas. Generación de Herramientas de Calificación y Evaluación Predictiva. Titular: Correa Cantaloube, Érica.
- PICT 2013-2036: Uso racional de la energía en edificios en altura: integración en la envolvente de sistemas de acondicionamiento pasivo y sistemas productores de energía (fotovoltaicos y solares térmicos). Titular: Ganem, Carolina.

## Referencias

- Alchapar N., Correa E. (2016). The Use of Reflective Materials as a Strategy for Urban Cooling in an Arid Oasis City. *Sustainable Cities and Society*, 27 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.08.015>
- Alchapar, N. L., Correa, E. N., Cantón, M. A. (2014). Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones. *Energy and Buildings*, 69, 22–32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.012>
- Alchapar N., Pezzuto C., Correa E., Labaki L. (2017) The Impact of Different Cooling Strategies on Urban Air Temperatures: The Cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina. *Theory & Application Climatology* 130 p. 35 – 50. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1851-5>
- Balter, J. (2015) Sustentabilidad de edificios en altura en Ciudades-Oasis. Características arquitectónicas y ambientales para el caso de la ciudad de Mendoza. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata.
- Balter, J., Ganem, C., Cantón, M.A. (2013) Evolución morfológica y materialización en edificios en altura en la ciudad de Mendoza. Incidencias en el comportamiento térmico interior. *Revista Área n°19*, p. 8 - 25. FADU- UBA.



- Balter, J., Ganem, C., Dicoli, C. (2016) On high-rise residential buildings in an Oasis-city: thermal and energy assessment of different envelope materiality above and below tree canopy. *Energy and Buildings* 113, 61-73.
- Barea, G., Mercado, V. (2016) Estudio de sistemas de climatización natural innovativos (Ventanas Multiazimutales - SIRASOL) en distintas localidades – 3er Congreso Sudamericano de Simulación de Comportamiento de Edificios. 4ta Jornada – BIM – FADU.UBA.
- Bruse E. ENVI-met 3.1. On-Line Manual. 2006. Disponible en: <http://www.envi-met.com>.
- Bórmida, E. (1984). Mendoza, una ciudad Oasis. Mendoza: Universidad de Mendoza.
- Cantón, M.A., Cortegoso, J.L., De Rosa, C. (1994). Solar permeability of urban trees in cities of western Argentina. *Energy Buildings* 20.
- Cantón, M.A., Mesa, A., De Rosa, C. (2004) Análisis de los modelos de desarrollo del arbolado urbano como estrategia de control de la radiación solar en la estación cálida. II Reunión Binacional de Ecología. *Ecología en Tiempos de Cambio*, Mendoza.
- Energy Plus. The official building simulation program of the United States Department of Energy. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> [accessed 16/06/2013]
- Filippin, C., Flores Larsen, S., Mercado, V., (2013) Monitoreo, simulación y calibración del Comportamiento térmico de un edificio bioclimático en Argentina. XII ENCAC Encuentro Nacional de Conforto no Ambiente Construido y VIII ELACAC Encuentro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construido. Setiembre. Brasilia. Brasil
- Grossi Gallegos, H., Righini, R. (2011). Acerca de la representatividad de los valores de radiación solar global medidos por la Red Solarimétrica en la Pampa Húmeda. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.
- Kántor N, Lin T, Matzarakis A (2014). Daytime relapse of the mean radiant temperature based on the six-directional method under unobstructed solar radiation. *International Journal of Biometeorology* 58 (7) 1615–1625
- Kolher, N., Hassler, U. (2002). The building stock as a research object. *Building Research & Information* 30.
- Kuo-Tsang, H., Yi-Jhen, L. (2017). Impact of street canyon typology on building's peak cooling energy demand. *Energy and Buildings* 154, 448-464.
- Longobardi, M., Hancock, M. (2000). Field trip strategies. *Proceedings of TIA.Oxford*.
- Martinez, C., Ruiz, M., Atencio, L. (2017). Proyecto integral de forestación y reforestación urbana para Mendoza. *Sustentabilidad ambiental del bosque urbano para ciudades de zonas áridas de Argentina"- Etapa 1 UNICIPIO - Provincia de Mendoza. Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía INAHE – CCT CONICET Mendoza. 96 pp.*
- Mercado M.V., Barea Paci, G., Esteves, A., Filippín, C. (2018) Efecto de la ventilación natural en el consumo energético de un edificio bioclimático. Análisis y estudio mediante energy plus. *Revista Hábitat Sustentable* Vol. 8, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 54-67 <https://doi.org/10.22320/07190700.2018.08.01.05>
- Mercado, V., Esteves, A., Filippín, C. (2010) Comportamiento térmico-energético de una vivienda social de la ciudad de Mendoza, Argentina. *Ambiente Construido*, Vol. 10, tomo 2; *Revista On-line*: <http://www.seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido>. pp.87-101.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being e Current State and Trends*. Washington, DC: Island Press.
- Morakinyo, T.E., Dahanayake, K.W.D., Adegun O.B., Balogun A.A. (2016). Modelling the effect of tree shading on summer indoor and outdoor thermal condition of two similar buildings in a Nigerian university. *Energy and Building* 130, 721-732.
- Oke, T.R. (2004). *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*. Iom Report. World Meteorological Organization. Geneva.
- Pastore, L., Corrao, R., Heiselberg, P.K. (2017). The effects of vegetation on indoor thermal comfort: The application of a multi-scale simulation methodology on a residential neighborhood renovation case study. *Energy and Buildings* 146, 1-11.
- Schwed, D., Sheng, M. (2017) Assessment of the annual energy demand for cooling of buildings in their urban context in 26 cities in China. *Procedia Engineerin* 198, 305-312.
- Secretaría de energía (2014) Informe Nacional de Monitoreo de la Eficiencia Energética de la República Argentina, 2014. Disponible de: [http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37142/S1420670\\_es.pdf?sequence=4](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37142/S1420670_es.pdf?sequence=4). Acceso en: Enero 2018.
- Sosa, M., Correa, E., Cantón, M. (2018) Neighborhood designs for low-density social housing energy efficiency: Case study of an arid city in Argentina. *Energy and Buildings*; 168 137 -146. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.006>
- Yang, X., Zhao, L., Bruse, M., Meng, Q. (2012) An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. *Energy and Building* 54, 243-251.



# The state of the art of the existing tools for building retrofitting

## Estado del arte de herramientas para el reacondicionamiento ambiental de edificios

**Alex Gonzalez Caceres** (Autor principal / Autor de Contacto)

Filiación: OsloMet – Oslo Metropolitan University, Oslo, Technical University of Denmark, Copenhagen

Dirección: Department of Civil Engineering and Energy Technology, OsloMet—Oslo Metropolitan University, Postboks 4 St. Olav plass, 0130 Oslo, Norway,; Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Building 118, Room 243, 2800 Kgs. Lyngby, Denmark

Correo: [aagc@byg.dtu.dk](mailto:aagc@byg.dtu.dk), [alexgc@oslomet.no](mailto:alexgc@oslomet.no)

**Muriel Diaz**

Filiación: Departamento de Diseño y Teoría de la Arquitectura, Universidad del Bío-Bío,

Dirección: Av. Collao 1202, 4051381 Concepción, Chile

Correo: [madiacz@ubiobio.cl](mailto:madiacz@ubiobio.cl)

**Manuscript Code:** 015

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

### Resumen

El reacondicionamiento ambiental de edificios existentes ofrece oportunidades significativas para reducir el consumo de energía global y las emisiones de gases de efecto invernadero en el área de la construcción. Por lo tanto, se considera uno de los principales enfoques para lograr la sostenibilidad en el entorno construido a un costo relativamente bajo y con altas tasas de aceptación. Aunque existe una amplia gama de tecnologías de mejoramiento disponibles, los métodos para identificar las medidas más rentables para cada proyecto siguen siendo un desafío técnico importante. Numerosos proyectos han sido desarrollados en todo el mundo para enfrentar este desafío, sin embargo, muchas de las herramientas tienen una aplicación local, por lo que muchos de estos proyectos son desconocidos en el ámbito internacional, resultando en una limitada transferencia de conocimiento. Esta revisión organiza los resultados en tres categorías: evaluación de la renovación, financiera y transferencia de información. Por otro lado, se considera que las herramientas para promover la renovación de edificios difieren de acuerdo al usuario, por ejemplo, los propietarios necesitan recomendaciones para renovar sus propios edificios, mientras que otras herramientas se centran en proporcionar información a nivel general a políticos e inversores a una escala de información mayor, señalando las áreas donde existe un potencial de renovación energética o para el uso de fuentes de energía renovables. Finalmente, se presentan herramientas para evaluar las viviendas existentes que buscan registrar y caracterizar los edificios. Estas herramientas comúnmente llamadas herramientas de certificación tienen diferentes grados de sofisticación y de enfoques. La revisión muestra que muchas herramientas tienen el potencial de unir sus capacidades, lo que puede generar muchas oportunidades de innovación en el área del reacondicionamiento ambiental de edificios.

**Palabras claves:** herramientas de evaluación de reacondicionamiento ambiental, certificación de edificios, evaluación energética de edificios.

### Abstract

The retrofitting of existing buildings offers significant opportunities to reduce global energy consumption and greenhouse gas emissions in the build environment. Therefore, it is considered as one of the main approaches to achieve sustainability in the built environment at a relatively low cost and high acceptance rates. Although there is a wide range of retrofitting technologies available, methods to identify the most cost-effective measures for each project remain a major technical challenge. Numerous projects have been developed worldwide to face this challenge with different approaches; however, many of the tools meet only local objectives, which is why they are unknown in the international arena, showing a limited knowledge transfer. This review organizes the results under three categories: renovation assessment, financial assessment and Transfer of knowledge. The tools focusing on promoting the renovation of buildings differ in the type of user to whom the tool targets for example, the owners need information and recommendations to renovate their own buildings. Where other tools focus on providing information to politicians and investors where the scale of information is greater, pointing out areas where an energy potential that can be improved through renewal or the use of renewable energy sources is highlighted. Finally, other tools to comply with policies that seek to register, evaluate and characterize the existing buildings. These tools commonly called certification tools, have different degrees of sophistication and approaches. This review, provides researchers, construction professionals, and politicians with a better understanding of the advances made to effectively design buildings retrofitting measures, promote energy conservation and the assessment of the building stock for the development of policies. The review shows that many tools have the potential of joining their capabilities, which can produce many opportunities for innovation in the retrofitting area.

**Keywords:** Retrofitting evaluation tools, building certification, building energy evaluation tool

## Introduction

It is well known that the building sector has a great share of responsibility on global energy consumption, which is expected to grow in the next decades (Pacheco-Torgal, 2017). Even more it has been reported that consumption of buildings is exceeding the other major sectors like industry and transportation (Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008). Therefore, building renovation is a the key point to reduce global energy uses and CO2 emissions (Ürge-Vorsatz, Harvey, Mirasgedis, & Levine, 2007), as building for better indoor quality and lower fuel consumption reduces carbon dioxide emissions and pollutes less the environment (Basarir, Diri, & Diri, 2012). Reason why retrofitting existing buildings represents one of the major challenges for the transition to a low carbon society (Christensen, Gram-

Hanssen, de Best-Waldhober, & Adjei, 2014). In this context, governments around the world have taken strong measures towards the retrofit of existing buildings in terms of improving energy performance (El-Darwish & Gomaa, 2017), with different approaches, since Retrofitting existing buildings for energy efficiency involves substantial funding and decision-making from a wide range of stakeholders such as landlords, tenants, property managers, developers and local council (Alam et al., 2016). Moreover, there are many Barriers that may prevent renovation (C. Wilson, L. Crane, & Chryssochoidis, 2015), in the case of retrofitting, energy efficiency strategies are mostly not applied due to a lack of certainty about the amount of investment required and the efficiency of the potential energy saving strategies (Basarir et al., 2012). The clearest attempt to address this issue it has been done by the European Union where a certification system has been put in place for existing buildings. The certification was designed to provide information to building owners and tenants on the energy performance of their buildings, heating and air-conditioning systems, and on effective ways to improve these through building renovation works (European Commission, 2016). The certificate provides as well expected saving and the cost involved if the measures are carry out. However, the results from that evaluation shows that that tool need several improvements in order to be uses effectively as a trigger for renovation purposes (European Commission, 2016) (Geissler & Altmann, 2015). As it was stated above, renovating existing building stock is a relevant issue, however, before taking actions, there is a need to direct efforts in the right direction and to do so, the main actors must be identified as well as their specific needs in terms of knowledge, tools and information. In practice the decision to retrofit a building is, in most cases, up to the building owners, who need to understand clearly the benefits on the short and long term, have confidence on the projections of savings and indoor quality conditions and have a clear estimation of the costs of the retrofitting.

According to the result from IBROAD survey, applied in three European countries (Volt, Fabbri, & Groote, 2018), **homeowners'** motivations to invest in energy renovation are centered around comfort and energy use/cost. Being the upgrade of their home to a warmer and more comfortable house by large the most common aspiration. This report, also adds that the most wanted information from homeowners is, estimated costs of each renovation step, expected benefits in terms of reduced heating/bills and technical information to help them avoid mistakes. When it comes to performing the renovation project, most of the homeowners will hire a contractor to do the job. However, a significant share of the interviewers claim that some of task of the renovation are performed by themselves. This is coherent with the case of other countries like Norway where homeowners renovate their home mostly because they enjoy working in their home. On the other hand, The Building Performance Institute of Europe (BPIE) survey [6] identified that there are many barriers related to knowledge and technical expertise within **energy consultants, certifiers and architects**. They also have different levels of knowledge and participate differently in a renovation process. Energy consultants are closer to auditing, although they are oftentimes too expensive to hire for a single house residential retrofitting. In general, most consultants will use tools that are more sophisticated than the ones that a regular architect would use. It is relevant to note that not all architects are interested in the energy performance of buildings, nor have the competence to develop successful measures to improve the energy performance of buildings, therefore special requirements on information and communication are needed (Bittner & Lechner, 2004). In general, architects tend to look for a general understanding of the problem to explore acceptable solutions and are prone to propose the design solutions on the basis of experiential knowledge (Cross, 2006). To add up, construction actors involved in renovation projects, specially in residential buildings, lack of knowledge of the s available option to upgrade buildings and issues associated with the implementation of specific retrofit. Regarding the accuracy of the measured energy performance of an existing dwelling, data collected by a consultant through building inspection has a very strong impact on the outcome of the calculation of the Energy Performance Indicator and therefore the retrofitting measures are more effective. For a reliable data basis and the comparability of the collected data, consultants have to be aware of what the sensible points are, through home Inspection (Bittner & Lechner, 2004).

The scale of information needed by **Policies makers** and investors is much greater, since they must evaluate it at national, communal or district scale. In general, the studies on this area deal with identifying quarters or building typologies in need of retrofitting considering, age, state of conservation, energy consumption and ownership among other indicators. This allows to find segments with a high propensity to renovate or with needs or vulnerabilities. Some of the policies in place at the time include evaluating properties that are put in the market (new or used) through energy performance certificates, and giving financial incentives or support towards old 'hard-to-treat' properties or low income neighborhoods. Other examples of policies include comparative billing to increase the 'observability' of household energy consumption, hiring energy service companies to manage the 'complexity' and cognitive burden of renovation decisions, and neighborhood and community programs, as well as open house schemes, to support social communication on energy efficiency.

In sum, although the building construction sector and stakeholders acknowledge the need for integrated solutions for maintenance and renovation, there is lack of specialized knowledge on how and when to successfully maintain, manage, adapt, transform and redesign (Itard, 2008). Moreover, most crucial decisions happen in the first stages of

the design process; thus, designers need tools that will assist them in creating better and more sustainable refurbishment projects (Konstantinou & Knaack, 2011)

## Review of tools for building retrofitting

There have been limited attempts to systematically review available analytical tools for improving energy efficiency in the buildings sector, where most of the existing reviews of tools and methods have a broader scope than energy efficiency in buildings (Petrichenko, Aden, & Tsakiris, 2016). It is worth noting a report from Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) (Lee, Hong, & Piette, 2014) in 2014, reviewed sixteen existing tools available for retrofitting purposes, targeting small and medium size office and retail buildings for California-specific conditions and it concludes that an easy-to-use, readily accessible retrofit assessment tool is needed to help Small and Medium Building owners to make wise decisions by providing information about energy savings and economic benefits from the investment in energy efficiency retrofits.

The goal of this work is to review the currently available retrofit tools available for homeowners, energy consultants and policymakers, targeting residential buildings. Researchers investigated retrofit tools both in the public domain as well as in the private sector to better understand the diverse approaches currently in use to evaluate retrofit options: specifically, calculation methods, retrofit measures, financial assessment, and policy development.

To map the existing range of tools and to facilitate building energy efficiency improvements, this working paper presents an overview and categorization of current tools, as well as offering a decision tree, illustrating the types of tools policy and project development in the field of energy efficiency in buildings.

## Methodology

To prepare the review two main tasks were fulfilled, tool selection and categorization. For the selection, fifty tools were studied, being sixteen the application that are included in this research. It has been either identified as relevant due to their contribution to help in the renovation tasks, in designing a different model of evaluation, assist in specific solutions, provide detailed support to key users or deliver information in a different, interactive and influential way. The categorizations were organized into three groups, renovation assessment, financial assessment and transfer of knowledge. Each tool was resume, delivering an introduction of the tool, their feature and the novelty.

**Renovation assessment:** In this category tools are selected due to their capacity to assist in the evaluation of measures for renovation, either by delivering technical recommendations, energy reduction, design guidelines, comparison of scenarios, etc.

**Financial assessment:** Tool dedicated to assist in the economical phase of the renovations process are included in this group. Not limited to just the calculation of the savings or finding the cost optimal, also tools that provide costs, tailor approach to evaluate implementation costs or to help investors to find investments opportunities.

**Transfer of knowledge:** Renovation is not only about defining profitability or accurate renovation measures. It also can be included the transfer of knowledge, either to promote the benefit of renovation or help stakeholder to produce better guidelines, policies or evaluate program, etc.

## Results

Renovation assessment requires multiple tasks therefore, to find a tool one size fits all, it may be not the most appropriate solution. Due to this, in the study several tools are presented that can contribute during the renovation assessment, the selection explores different approaches to support the renovation decisions rather to find the most complete tool. The targeted audience; energy consultant, certifier or architect are relevant for the classification, as well as energy performance and life cycle cost assessment. This section presents detailed information from each tool, summarizing how the tool can serve during a renovation process, the scope, features and targeted user. In total, the study examines sixteen selected tools. Table 10 outlines the diverse features of the sixteen tools, including developer, target buildings, user groups, and interface type, calculation methods, and gaps.

### Renovation assessment

**INSPIRE:** Is a software developed within the framework of the international Eracobuild project INSPIRE. The INSPIRE Tool focuses on residential buildings and simple office buildings without cooling needs (Almeida & Ferreira, 2017). It was designed following the principles of ISO 13790 and considering energy performance of building envelope, outdoor climate, target indoor temperature, and internal heat gains.

**Features:** The tool allows to investigate trade-offs and synergies between different retrofitting measures and to identify strategies aiming at reducing primary energy use and greenhouse gas emissions while being cost-effective. The tool includes a database of empirical techno-economic characteristics in different categories.

**Novelty:** The novelty of the tool is to assess relations between GHG emissions or PE use vs. the life cycle costs. Typically, this kind of tools includes only the calculation of GHG emissions and PE use. The tool includes a wide variety of options to be evaluated in terms of GHG emissions and PE use reduction. The strength of the tool is a possibility to compare different renovation packages with reference cases and to build up a renovation strategy with different steps. This enables users with little detail-knowledge to use the tool and to generate (preliminary) results in the first stage of development. All default-values from the database can be overwritten at any time if more accurate values are available. This approach makes the INSPIRE Tool a good choice in any phase of a retrofit project. User: The software was developed as a Microsoft Excel spread-sheet, providing maximal flexibility and a familiar working environment for the user. For easy updating and maximal performance the data is stored in a separate file and accessed by using industry-standard SQL commands (Jakob et al., 2013).

**A56opt-tool:** This software was developed in the framework of the International Energy Agency's Energy in Buildings and Communities (IEA EBC) program Annex 56: "Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation". The tool aims to support decision making in terms of building renovation (Dalla Mora, Peron, Romagnoni, Almeida, & Ferreira, 2018) allowing to compare and evaluate different packages of renovation measures.

**Features:** Is a tool for analysis of the cost-effectiveness of energy-related renovation of existing residential buildings and low-tech office buildings (without HVAC systems). The software is on a Microsoft Excel spreadsheet structure, providing maximal flexibility and a familiar working environment for the user. The Excel sheet uses simulation data that comes from other tools related to each renovation scenario under analysis, such as: area of intervention, energy performance (energy needs or use), costs (investment, maintenance, energy) and environmental impact (GWP and / or embodied energy (Almeida & Ferreira, 2017). The main results of different renovation packages are presented in graphs of emissions in relation to the life cycle costs for each renovation package and primary energy use in relation to the life cycle costs of each renovation package (Dalla Mora et al., 2018).

**Novelty:** A56opt-tool allows performing optimization analysis, providing renovation packages comparing and evaluating them, identifying the cost optimal and the cost-effective solution, using secondary information and simulation data coming from other tools related to each renovation scenario under analysis.

#### Financial assessment

**The Total Concept:** Is a method for improving energy performance in existing non-residential buildings with the aim of assuring maximum energy savings in a profitable way by applying a comprehensive approach, accurate investment & return forecasts and close follow-up. (Wahlström, Maripuu, & Abel, 2015)

**Features:** The tool provides a method based on an action plan comprising a package of measures that fulfils the property owner's profitability requirements. To present the cost-efficiency in a simple-to-understand way, internal rate of return model is used. When forming the action package both the single cost-efficient measures ("low hanging fruits") and the costlier measures are considered. From an economic point of view, the single cost-efficient measures are related to and support the costlier measures. This way of working has shown that total energy savings of up to 50% are possible. The profitability calculations are done with the Total Concept tool, the TotalTool, where the outcomes are illustrated in a simple-to-understand way by using an internal rate of return diagram.

**Novelty:** The method is based on the same economic conditions, calculating the global cost of a package of measures as the cost-optimal methodology, but the results of the calculations are presented in a different way. It aims at presenting how to go further with more measures carried out and still meet the profitability expectations set by the building owner.

**ECC:** European Construction Costs, or ECC, is an online platform dedicated to making construction cost data in Europe more accessible to project developers, investors, quantity surveyors, architects and other important stakeholders in the construction industry.

**Features:** The database provides detailed data of a wide range of European construction costs. It works as an online cost calculator, developed to help improve the quality, reliability and effectiveness of construction cost management. It was founded by IGG Bointon de Groot and Rider Levett Bucknall, in collaboration with the RLB Euro Alliance.

**Novelty:** ECC is an online European cost database, that opens many opportunities either for construction companies, building projects, but also for economical assessment. Through an official cost data base, economical assessment for renovation can be designed using standardized methods, and policies can benefit from transparent sources of costs. This feature has not been explored by ECC, but could be used for these purposes.

**Easykenak:** his tool has been developed by a group of Greek energy auditors according to Greek standards and regulations for Energy Efficiency of Buildings. The application is targeted to energy efficiency professionals who are certified by the Greek Ministry of Environment as Energy Auditors.

**Feature:** Easykenak is a web-based application which minimizes the time required for the Energy Performance certification (EPC). The online tool, sets four simple steps to produce an EPC, saving time and being tailored to the needs of the certifiers day-to-day work. The tool includes a feature to quickly draw the building calculating automatically the envelope data, it also includes an algorithm that helps the auditor calculate surfaces of the envelope (opaque and transparent) as well as U values. Once all the data has been submitted, it is processed and is then

possible to calculate the Energy Efficiency of the Building. The energy performance results are displayed to the certifier who has the option to select from a wide assortment of energy efficiency measures and re-calculate the energy performance, adding up to 3 energy efficiency scenarios. The certificate can be downloaded in an xml file.

**Novelty:** Is a private initiative to improve and facilitate the process for certifiers to calculate and obtained an EPC under the Greek regulation.

**ENERPAT:** (Energy Planning Assessment Tool), has been developed by the research group ARC Engineering and Architecture La Salle, within the framework of the ENERSI project funded by the "State Research, Development and Innovation Program Oriented to the Challenges of Society" (RTC-2014-2676-3), carried out in the period 2014-2017.

**Features:** it is an application that enables professionals in the building sector (architects, urban planners, builders, technicians and municipal managers) to assess the state of the residential building stock and define rehabilitation strategies to improve the energy efficiency of the buildings. The application integrates the data obtained from the Energy Performance Certificates provided by the Catalan Institute of Energy (ICAEN), the cadaster and the census sections, together with geographic information. The rehabilitation measures are based on the ICAEN simulation tool and the "Long-term strategy for energy rehabilitation in the building sector in Spain" (ERESEE 2014).

**Novelty:** The online tool allows to visualize EPC label of buildings in selected cities, estimating the improvement that could be obtained if renovation take place in a certain percentage of building by each category, numbering the measures for each group, this included cost, energy savings and return of the investment.

**EPIQR Software:** Development of a European methodology and software for building audits of apartment buildings and techno economic assessment of refurbishment actions for improved energy performance and indoor environmental quality.

**Features:** During the building audit, the user specifies the elements/types for a given building and determines their stage of deterioration by selecting a deterioration code "a, b, c, or d" that best fits the observed state of each element/type. Before making the selection, the user can review the corresponding text with a detailed description and several photos that illustrate the four possible deterioration stages. A total of about 500 photos and sketches support the user to select the appropriate deterioration code. The software (Flourentzos, Droutsa, Wittsen 2000) contains for each building element a description of usual deterioration and corresponding refurbishment work including costs, potential upgrading work as well as related national standards and guidelines.

**Novelty:** decision process of whether and how maintenance and refurbishment should be done. EPIQR uses a systematic diagnosis formalism to determine the current state of deterioration of each element and its impact on energy consumption and indoor environment quality. It also calculates the global refurbishment cost and the energy requirement of the new situation. A cost analysis is possible using the EPIQR cost database with more than 900 detailed refurbishments.

### Transfer of knowledge

**EHED:** A user-friendly software, named EHED, has been developed to predict the airtightness of Chilean homes.

**Features:** The software is aimed at non-expert users in the sustainability area, to evaluate the expected behavior of the home, with different scenarios and options which allow orientating the design stage. The software allows to predict the performance of homes under the building regulation, targeting designers, builders or owners to make decisions when making changes to improve airtightness. The calculation model was obtained by analyzing the airtightness of homes in Chile, supported by laboratory and onsite measurements of the home's components (González Cáceres, Recart, Espinoza, & Bobadilla, 2016).

**Novelty:** The software could be uses to retrofit existing dwelling base on the expected improvement on airtightness reducing the energy need for heating.

**EnergySavingCheck 3.0:** is an integrated energy advising tool for homeowners and tenants. It is user-friendly and provides valuable information on the household's energy and water consumption. It was first introduced by Caritasverband Frankfurt e.V, Germany for the EU-funded project ACHIEVE and it is based on the calculation tool of the Cariteam Energiesparservice.

**Features:** The software is based on an Excel sheet. It requires significant information as inputs, such as data on energy and water use and costs (from bills), electricity using devices (lightning, cooking, washing, entertainment, cooling, heating etc.), state of the building (heating system, insulation, windows, the position of flat, etc.). After the estimation of current energy and water consumption, the end user can calculate the energy and water savings and take the appropriate steps for reducing energy and water use. Also, the relevant carbon dioxide footprint can be calculated.

**Novelty:** It can be used in the residential sector, but it targets energy poor households, advising residential buildings that cannot afford their energy/electricity bill and/or keep their flat/house adequately warm at reasonable cost.

**eeMeasure:** is a web based software developed for the European Commission, which enables social housing organizations and municipalities to quickly evaluate their energy policies.

**Features:** It allows for a harmonized way of recording and calculating energy savings of projects funded by the Information and Communications Technology Policy Support Program (ICT PSP, through a consistent methodology. The software tool is designed to facilitate the evaluation of all kinds of energy saving effects produced by a variety of

ICT-based solutions, including behavioral changes and improved public awareness. The aim of ICT PSP projects is to demonstrate the energy efficiency benefits ICT can bring to building owners and their inhabitants. ICT PSP projects currently include approximately 10,000 social dwellings and 30 public buildings (hospitals, schools, etc.)

**Novelty:** It helps policy-makers to produce a better quantitative analysis on the energy savings potential of ICT based solutions in residential and non-residential buildings.

**The HERON-DST:** An innovative, friendly to the end user, software developed by KEPA in the frame of the HERON project (H2020, Grant Agreement No. 649690), it aids policy makers and market stakeholders in their energy efficiency policy making for buildings and transport.

**Feature:** The HERON-DST stands for Decision Support Tool, it provides a user-friendly software that facilitates the selection of the optimum combination of technologies and practices minimizing the negative impact of end-users behavior in the implementation of energy efficiency scenarios to be used by policy makers. One of the reasons for seeking an approach that quantifies the barrier impact is the need to have numerical inputs for the forward-looking energy efficiency modelling (National & Kapodistrian University of Athens-Energy Policy and Development Centre, 2016).

**Novelty:** The HERON-DST allows to calculate the impact factors of behavioral barriers on the inputs drivers or alternatively on final users.

**TABULA:** Developed based on the common DATAMINE data structure and the experiences of typological classification. The objective of the project was to create a harmonized model for European building typologies, in particular, residential buildings. The set of typologies represents different construction periods and building sizes. The results of the building typologies are compiled and presented in the TABULA web tool (Ballarini, Corgnati, & Corrado, 2014).

**Feature:** On that basis, each participating country developed a national "building typology", that is a set of modeled reference buildings (named "building types" in the project), each of them with its specific energy related properties. The building types were used by each country to display energy consumptions and to assess potential energy savings achievable through retrofitting actions tackled to the building envelope, space heating and domestic hot water systems. In the project, two levels of retrofit actions were defined: "standard" through the implementation of measures commonly applied within the country and "advanced" through measures that reflect the use of the best available technologies (Loga & Diefenbach, 2010).

**Novelty:** The online tool provides data to analyze the existing building stock by typology, construction year, materiality etc. the project has been used for policy making, research projects related to existing building renovation.

**ENERFUND:** is a European project aiming to develop and promote a tool for stakeholders to make intelligent decisions on energy renovation strategies. The tool targets local authorities, financial institutions and ESCOs, as an evaluation tool before examining in more depth the feasibility or usefulness of deep energy renovation of commercial and other buildings.

**Feature:** The website tool rates and scores deep renovation opportunities – like a credit score used by banks to rate clients. The tool is based on a set of parameters such as Energy Performance Certificates (EPCs), number of certified installers, governmental schemes running, etc. By providing a rating for deep renovation opportunities, energy services or product companies can identify customer segments based on their needs, environmental department heads can assess and compare buildings when prioritizing deep renovation and deciding on fund allocation and financial institutions can provide targeted loans for building retrofits. ENERFUND is a tool that enhances public awareness in building retrofit potential.

**Novelty:** An interactive map of Europe where the user can visualize the energy ratings of buildings and narrow them down by applying filters, where the data can be easily analyzed. The interface consists of multiple layers, which use a range of different mapping technologies, through the large amount of data and visual capabilities, the app can be used by several stakeholders.

**Em Build Navigator:** is a project financed under the Horizon2020 Programme which developed a comprehensive online guidance tool providing practitioners in Europe with practical instructions on how to design and implement a renovation strategy for buildings. The EmBuild Navigator is structured around three main pillars: Plan, Invest, Benefits, which all are all aimed to provide local municipalities with the right toolbox to construct a successful strategy for the renovation of public buildings.

**Features:** The Navigator starts with the planning: the value of a strategy consists not only in the renovation strategy itself but also in the process behind its development. The available tools include spreadsheets, templates and analysis on the exploration of the regulatory framework, the technical solutions, the barriers, and a national renovation strategy template. EmBuild partners provided a set of best-practice examples and recommendations on how to plan and direct interventions on public buildings and private housing and attract investment. The Navigator provides local authorities with a reference to address benefits of renovation measures to target groups, as well as to strengthen motivational aspects in building renovation programs and illustrate that renovation is not only a matter of energy savings.

**Novelty:** With the use of EmBuild material, municipalities can use a comprehensive approach to plan, invest and implement wider benefits in their decision-making process and in the necessary reporting and evaluation schemes for deep renovation measures. The tool will raise the knowledge and awareness amongst local stakeholders on the wider benefits of renovation, such as comfort, air quality and local jobs.

**EDGE:** is an online building design software, a certification system, and a global green standard for more than 140 countries. The platform is intended for anyone who is interested in the design of a green building, whether an architect, engineer, developer or building owner (International Finance Corporation (IFC), 2018).

**Features:** EDGE is intended to meet the demand for a quick, easy and affordable online application that can be used to plan and assess the design of resource efficiency to scale up green building growth. The complexity of the underlying methodology lies beneath the application's interface so that industry professionals can easily determine resource efficiency and associated cost savings without the necessity of hiring energy specialists or purchasing additional modelling software. EDGE incorporates available embodied energy data of construction materials from around the world. The major point of reference for the data, which is also referred to as Materials Life Cycle Analysis, is the Inventory of Carbon and Energy (ICE) developed by the University of Bath.

**Novelty:** EDGE utilizes thermal calculations to determine the building's overall energy demand, including requirements for heating, ventilation and air-conditioning, as well as domestic hot water, lighting demands and plug loads. EDGE also estimates water use and the embodied energy of materials used in constructing the building, to create a comprehensive analysis of projected resource usage.

**EnergimerkeKalkulator:** is a Norwegian website tool used to generate EPC based on a self-assessment method, with this building owners can produce their own certificate without spending money on a certifier.

**Features:** For the evaluation of existing buildings there are two options, where the first allows the homeowner (non-expert) to generate their own certificate, this option requires little technical information about the building, such as age of the construction, floor area, and energy sources. Many aspects are standardized, such as the building shape, windows and doors area, floor to ceiling height, etc. The second option requires information that is more detailed, High-level knowledge is not needed, but this option is more time consuming than the first one, especially the description of the envelope, where customized U-values can be added.

**Novelty:** This system intends to encourage the owners to be more involved and to stimulate their interest in energy efficiency (Isachsen, Rode, & Grini, 2011).

## Discussion and Conclusions

An extensive review of 16 tools used for renovation purposes was selected and presented in brief but in a comprehensive way. The tools were grouped by their target user, renovation assessment, dissemination and certification of existing homes. The results of the reviews show that innovation in tool design is relevant prove of this and the number of tools developed under research projects with organizational funding ads to this statement. It is clear that renovation of existing buildings is a priority issue, where different sectors have space to promote new ideas and contribute in the development of solutions, from the public or commercial sector. Another remark is the wide spectrum of tasks and approaches that these tools have implemented, including fuel poverty, water savings, airtightness improvements, policy evaluation etc. As well as the users that are target, among other homeowners, municipalities, investor and policy-makers. Despite that many of the tools are no longer available; their contribution may be used for developing new tools based on their scheme, upgrading their capabilities with the current technology. Equally important is the fact that no tool can do it all, and online tools are becoming more popular an accessible for the users, the promotion of these software is another key factor to trigger their uses and the renovations of the existing building stock. From this review, it is clear therefore that there is no common agreement on the scope, indicators and calculation methods for the evaluation of retrofitting measures. Differences in the approach to retrofitting are dependent on the scope of the development agency and on the country framework on climate change mitigation. The results of this review are the base for the development of a new tool targeting renovations in residential buildings, where the presented tools may be uses as part of a methodology to assess renovation measures under the EU Energy Performance Building Directive (EPBD).

Table 10: directory of studied tools

| Tool              | Target audience                          | Main features  | System           |
|-------------------|--|--|------------------|
| INSPIRE           | Energy manager, architects and engineers | Cost optimal and cost effective measures             | Spreadsheets     |
| A56opt-tool       | Energy manager, architects and engineers | evaluating different packages of renovation measures | Spreadsheets     |
| The Total Concept | Energy manager, architects and engineers | Method to calculate profitable renovation measures   | Computer program |
| ECC               | Auditor, architects and engineers        | online European cost database                        | On-line          |



|                       |   |   |                  |
|-----------------------|---|---|------------------|
| Easykenak             | Certifiers                                    | Energy Performance Certificate  | On-line          |
| ENERPAT               | Auditor, architects and engineers             | Building stock analysis and provided renovation measures                              | On-line          |
| EPIQR                 | Auditor, architects and engineers             | Assist during building audits   | Computer program |
| EHED                  | Home owner                                    | estimated airtightness savings  | Computer program |
| EnergySavingCheck 3.0 | Home owner and policy maker                   | water consumption reduction   | Spreadsheets     |
| eeMeasure             | policy-makers                                 | evaluation of all kinds of energy saving  | On-line          |
| HERON-DST             | Policy makers and market stakeholders         | minimize the impact of end-users' behavior in the implementation of energy efficiency | Computer program |
| TABULA                | Policy-maker and researchers                  | Typological classification  | On-line          |
| ENERFUND              | Authorities, financial institutions and ESCOs | Rates and scores deep renovation opportunities  | On-line          |
| Em Build Navigator    | Municipalities                                | evaluation schemes for deep renovation measures                                       | Spreadsheets     |
| EDGE                  | professionals in the building sector          | Certification   | On-line          |
| EnergimerkeKalkulator | Home owners and Certifiers                    | Energy Performance Certificate  | On-line          |

## References

- Alam, M., Zou, P. X. W., Sanjayan, J., Stewart, R., Sahin, O., Bertone, E., & Wilson, J. (2016). Guidelines for Building Energy Efficiency Retrofitting. Paper presented at the Sustainability in Public Works Conference, Melbourne, Australia.
- Almeida, M. G. d., & Ferreira, M. A. P. S. (2017). Tools and procedures to support decision making for cost-effective energy and carbon emissions optimization in building renovation (Annex 56). In (pp. 1-80): Universidade do Minho.
- Ballarini, I., Corgnati, S. P., & Corrado, V. (2014). Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project. *Energy Policy*, 68, 273-284.
- Basarir, B., Diri, B. S., & Diri, C. (2012). Energy efficient retrofit methods at the building envelopes of the school buildings. *Mimar Sinan Fine Arts University*, 12.
- Bittner, B., & Lechner, R. (2004). A policy framework for Energy Performance Assessment for existing dwellings (EPA-ED ÖÖI 02/2004). Retrieved from <http://www.ecology.at/files/berichte/E08.450-3.pdf>
- C. Wilson, L. Crane, & Chrysochoidis, G. (2015). Why do homeowners renovate energy efficiently? Contrasting perspectives and implications for policy. *Energy Research & Social Science*, 7, 12-22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.03.002>
- Christensen, T. H., Gram-Hanssen, K., de Best-Waldhober, M., & Adjei, A. (2014). Energy retrofits of Danish homes: is the Energy Performance Certificate useful? *Building Research & Information*, 42(4), 489-500.
- Cross, N. (2006). *Designerly ways of knowing*: Springer.
- Dalla Mora, T., Peron, F., Romagnoni, P., Almeida, M., & Ferreira, M. (2018). Tools and procedures to support decision making for cost-effective energy and carbon emissions optimization in building renovation. *Energy and Buildings*, 167, 200-215.
- El-Darwish, I., & Gomaa, M. (2017). Retrofitting strategy for building envelopes to achieve energy efficiency. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 579-589.
- Commission Staff Working Document: Evaluation of Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings. Accompanying the document Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings (2016).
- Geissler, S., & Altmann, N. (2015). The role of recommendations in the Energy Performance Certificate. Retrieved from Concerted action EPBD: <https://www.epbd-ca.eu/wp-content/uploads/2011/05/CA-EPBD-EPC-recommendations.pdf>
- González Cáceres, A., Recart, C., Espinoza, R., & Bobadilla, A. (2016). Simple Tool to Evaluate Airtightness in Chilean Homes. *Sustainability*, 8(10), 1000.
- International Finance Corporation (IFC). (2018). EDGE Methodology Report - Version 1.0. Retrieved from <https://www.edgebuildings.com/wp-content/uploads/2018/07/180709-EDGE-Methodology-Version-1.pdf>
- Isachsen, O., Rode, W., & Grini, G. (2011). Implementation of the EPBD in Norway Status November 2010. Retrieved from <http://www.buildup.eu/sites/default/files/Norway.pdf>
- Itard, L. (2008). *Towards a Sustainable Northern European Housing Stock: Figures, Facts, and Future (Vol. 22)*: Ios Press.
- Jakob, M., R. Bolliger, Grünigen, S. v., Kallio, S., Ott, W., & Nägeli, C. (2013). Paper presented at the CISBAT 2013- Cleantech for Smart Cities & Buildings - From Nano to Urban Scale, Lausanne, Switzerland.
- Konstantinou, T., & Knaack, U. (2011). Refurbishment of residential buildings: a design approach to energy-efficiency upgrades. *Procedia engineering*, 21, 666-675.
- Lee, S. H., Hong, T., & Piette, M. A. (2014). Review of existing energy retrofit tools. Retrieved from
- Loga, T., & Diefenbach, N. (2010). Use of Building Typologies for Energy Performance Assessment of National Building Stocks: Existent Experiences in European Countries and Common Approach: IWU.
- National & Kapodistrian University of Athens-Energy Policy and Development Centre. (2016). A decision support tool (DST) reflecting end-users behaviour in energy efficiency modelling. Retrieved from HERON:
- Pacheco-Torgal, F. (2017). Introduction to Cost-Effective Energy-Efficient Building Retrofitting. In *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting* (pp. 1-20): Elsevier.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398.
- Petrichenko, K., Aden, N., & Tsakiris, A. (2016). Tools for Energy Efficiency in Buildings (978-87-93458-05-5). Retrieved from Washington D.C.:
- Ürge-Vorsatz, D., Harvey, L. D. D., Mirasgedis, S., & Levine, M. D. (2007). Mitigating CO2 emissions from energy use in the world's buildings. *Building Research & Information*, 35(4), 379-398. <https://doi.org/10.1080/09613210701325883>
- Volt, J., Fabbri, M., & Grootte, M. d. (2018). Understanding Potential User Needs. A survey analysis of the markets for Individual Building Renovation Roadmaps in Bulgaria, Poland and Portugal. Retrieved from <http://ibroad-project.eu/wp-content/uploads/2018/04/IBRoad-Understanding-potential-user-needs.pdf>



Wahlström, Å., Maripuu, M.-L., & Abel, E. (2015, 1 – 6 June). Total Concept – for better decisionmaking about energy efficiency investments in non-residential buildings. Paper presented



# SIMULACIÓN DEL INTERCAMBIO ENERGÉTICO EN EDIFICIOS MEDIANTE FUENTES EXTENSAS.

## Simulation of the Energy Exchange in Buildings through Extensive Sources.

### Lorenzo Muro Álvarez

Filiación: Universidad de Sevilla  
Dirección: Av. de la Reina Mercedes, 2, 41012 Sevilla. España  
Correo: lmuro@us.es

### Joseph Cabeza-Laínez

Filiación: Universidad de Sevilla  
Dirección: Av. de la Reina Mercedes, 2, 41012 Sevilla. España  
Correo: crowley@us.es

**Manuscript Code:** 017

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

### Resumen

En este paper proponemos un nuevo sistema de simulación revolucionario que parte de considerar todos los intercambiadores energéticos como superficies tridimensionales y regular a la vez el flujo entre los mismos de una forma espacial. Ello es posible debido a la matemática y algorítmica desarrollada por los autores en los últimos 20 años partiendo de los postulados de óptica geométrica iniciados por Lambert (1760) y desarrollados por Yamauchi y Higbie (1924). Las repercusiones de esta nueva técnica son evidentes, se consigue mucha mayor exactitud y visualización en los cálculos, afinar hasta el extremo el potencial de ahorro energético de las diferentes soluciones y llegar verdaderamente a influir en el diseño arquitectónico desde una perspectiva puramente científica. Tienen cabida tanto los edificios históricos de carácter no standard en cuanto a sus formas, así como en las nuevas soluciones que va deparando la técnica tanto en lo constructivo como en lo energético y un ejemplo muy claro son las nuevas fuentes de alumbrado superficial que suponen los LED. Estos, como es sabido, se alejan tanto del concepto arcaico de fuente puntual que ya no es posible predecir su comportamiento que las técnicas tradicionales y por ello obsoletas.

**Palabras claves:** Fuentes extensas, LEDs, Intercambio radiante, Intercambio energético, Simulación.

### Abstract

With this paper, we propose a new and revolutionary system of simulation that treats all energy sources as three-dimensional surfaces and regulates the flux between each other in the same spatial fashion. This is due to the mathematical investigations and algorithms enhanced by the authors in the past few years. Their postulates stem from the treatises in geometrical optics written by Lambert (1760) and subsequently by Yamauchi and Higbie (1924). Repercussions of such new techniques are evident as we achieve much more accuracy and visualize the calculations with perfect ease. Thus, the potential for energy savings increases significantly while designers become truly influential in architectural design from a purely scientific approach. We can deal with nonstandard historic buildings and likewise with new solutions produced by technical evolution both from an energy and construction point of view. A clear example of the former are the new surface lighting sources available by virtue of LED technology. The behavior of such luminaires is so distant from the traditional point-source arrangement that it is no longer possible to predict their performance through obsolete calculation methods.

**Keywords:** Extended sources, LEDs, Radiant exchange, Energy exchange, Simulation.

## Introducción

Tradicionalmente la simulación energética de edificios, como otros tipos de simulación por ejemplo mecánica, ha negado las características espaciales de los mismos. Ello se ha debido a diversos factores. En primer lugar, los campos térmicos se consideran como escalares y la idea querida por la ingeniería de espacios habitacionales mínimos fabricados en serie, con un techo y un suelo ambos planos y fijos en su posición relativa, no estimula la inversión en el conocimiento y estudio de diversas configuraciones espaciales más ricas y atractivas. Por otro lado, está la no desdeñable complejidad matemática que suscita esta cuestión, que ha llevado a obviar los estudios tridimensionales de transferencia energética en una situación negligente, aunque comprensible que conduce a groseras simplificaciones.

## Estado del arte del problema

En 1760 el científico suizo Lambert publica su obra singular *Photometria*, escrita en latín germanizado. En ella enuncia el famoso teorema XVI o principio de reciprocidad que dice: “*Si dos superficies son igualmente luminosas y están*

enfrentadas una a la otra de alguna forma, el flujo que incide desde cualquiera de las dos hacia la otra debe de ser el mismo" (Lambert, 1764). Este teorema, a su vez, nos permite formular la cuestión en términos de cálculo simbólico y de este modo llegamos a la ecuación canónica que rige cualquier intercambio radiante.

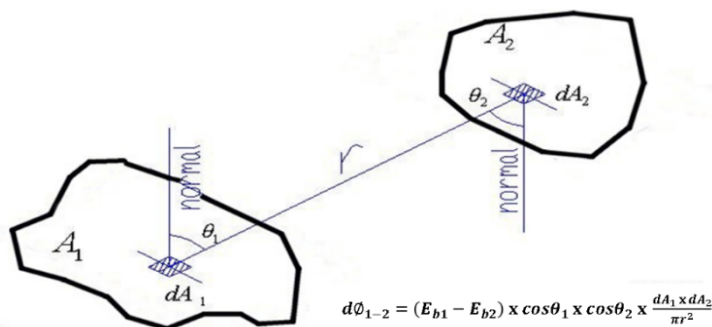


Figura 1. El intercambio radiante y su ecuación entre dos superficies cualquiera. Preparado por los autores

## Metodología

Lo anterior dará lugar a un álgebra asimétrica basada en dos propiedades fundamentales que pueden registrarse en bibliografía. Indicamos la solución que Cabeza-Laínez ha obtenido sin necesidad de integración cuádruple para el caso de superficies esféricas, que son abundantemente empleadas en el diseño arquitectónico.

Para explicar cómo funciona el método de cálculo tomamos el volumen más sencillo encerrado por dos superficies (el casquete esférico) en él hemos determinado que el intercambio radiante sobre el resto de la superficie vale siempre  $h/D$  (Cabeza-Laínez, 2012), donde  $h$  es la altura perpendicular a la base del casquete esférico y  $D$  el diámetro de toda la esfera (Figura 2). Esta expresión que coincide con la relación de áreas de las citadas figuras como puede fácilmente comprobarse, (ver abajo) es tan sencilla que provoca una notable facilidad de cálculo, evolución y programación informática que hemos procedido a desarrollar.

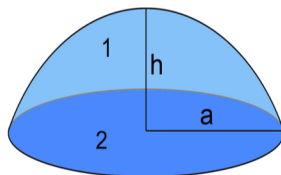


Figura 2. Dimensiones principales del casquete esférico. Preparado por los autores

Las relaciones entre las áreas como es sabido son:

$$A_1 = \pi \cdot 2 \cdot R \cdot h \quad A_2 = \pi \cdot a^2$$

$$A_{\text{tot}} = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \quad A_1/A_{\text{tot}} = h/(2 \cdot R) = h/D$$

De aquí surgen las 4 primeras leyes de Cabeza-Laínez que nos permiten resolver todas las operaciones algebraicas, incluido el producto escalar de factores de configuración que pueden surgir en los intercambios energéticos tridimensionales. Por ejemplo, el casquete esférico es solo el más simple de los cortes que podemos dar a una esfera, pero pueden existir otros que hemos desarrollado en la tercera ley de Cabeza-Laínez.

A partir de aquí mediante las operaciones desarrolladas en la bibliografía, es posible confeccionar programas informáticos muy exactos que permiten conocer con detalle la distribución de energía radiante (luz, sonido, calor) en los principales espacios arquitectónicos o de ingeniería sean existentes o por proyectar, teniendo en cuenta además sus características constructivas.

El método de Factores de Forma del profesor Cabeza-Laínez, se basa en el cálculo de los intercambios energéticos a través de los denominados coeficientes de configuración. Este método supone un importante avance en el

aprovechamiento de la radiación, que como hemos expresado se traduce en ahorro en el gasto energético, calidad de la energía y otras ventajas psicológicas y fisiológicas.

El método de Factores de Forma del profesor Cabeza-Lainez, se basa en el cálculo de los intercambios energéticos a través de los denominados coeficientes de configuración. Este método supone un importante avance en el aprovechamiento de la radiación, que como hemos expresado se traduce en ahorro en el gasto energético, calidad de la energía y otras ventajas psicológicas y fisiológicas.

### Herramientas de software basadas en lo anterior

Diana X es el nombre del software desarrollado por los autores a partir de los métodos arriba enunciados. Los factores de forma suponen un avance capital en los métodos de diseño y composición arquitectónica, porque permite entender en términos espaciales el intercambio radiante entre superficies y volúmenes. Para hallar el intercambio neto entre superficies usamos los denominados factores de forma, expresados mediante un número adimensional que nos ofrece el porcentaje de energía, que saliendo de una superficie 1 llega a la a otra superficie 2. El factor de forma entre dos superficies perpendiculares que comparten un eje común, después de la integración es (Figura 3):

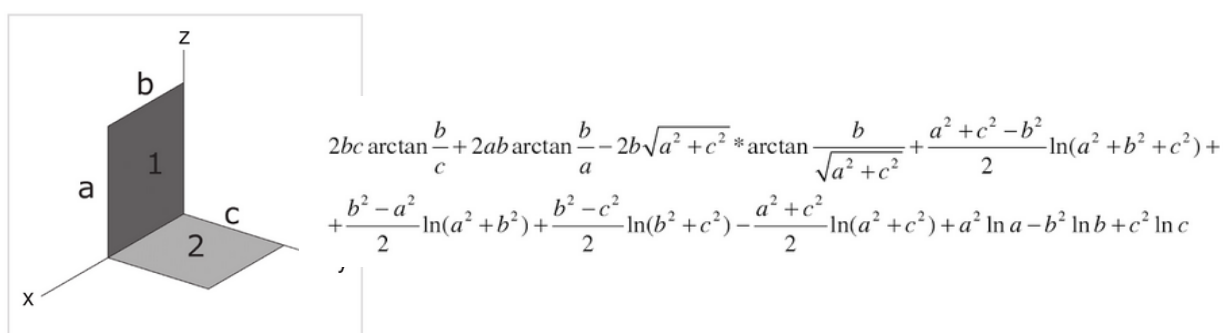


Figura 3: Factor de forma entre rectángulos perpendiculares que comparten un eje común. Preparado por los autores

Para conocer la distribución radiante, o campo lumínico, asociado a un plano debemos usar el factor de configuración (Figura 4), un número adimensional que expresa el porcentaje de energía que, originalmente emitido por una superficie, alcanza un punto contenido en otra superficie.

La solución general para el factor de forma no converge en los ordenadores convencionales, es por ello que para nuestro software hemos introducido la función phi definida por el científico japonés J. Yamauchi (1927), lo que provoca una enorme reducción de los tiempos de cálculo con amplia exactitud.

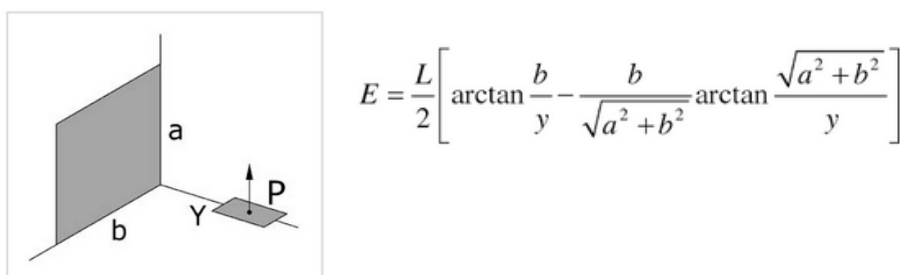


Figura 4: Factor de configuración entre un rectángulo y punto sobre la normal al vértice que pertenece un plano horizontal.

## Resultados

Con lo presentado hasta ahora, el lector está en disposición para extraer resultados útiles sobre el comportamiento de la radiación en los edificios, tanto existentes como proyectados. Usando este original software los autores han realizado diferentes casos de simulación de transferencias radiantes. A continuación, se exponen dos claros ejemplos.

**Caso 1:** Comprender la incidencia de la iluminación natural en un espacio acristalado en sus cuatro fachadas exige observar la contribución radiante de cada frente. Se propone un modelo inicial que dispone de una única fachada orientada a sur y progresivamente se van añadiendo el resto de cerramientos acristalados, norte, oeste y este. También se realiza el cálculo considerando un hipotético alfeizar perimetral de la mitad de altura del cerramiento acristalado.

Para una mejor aproximación arquitectónica, el estudio se realizará tomando de modelo la Glass House de Philip Johnson. Este hito arquitectónico se compone por un único espacio diáfano con un cerramiento completamente acristalado. Su planta es rectangular de 10 x 17 metros y su altura libre es de 3,65m. Los niveles lumínicos exteriores previstos para cada una de las orientaciones son los habituales de un día de cielo despejado de primavera en New Canaan, Connecticut, USA: 5000 lx orientación sur, 3000lx orientaciones este-oeste y 2000lx orientación norte. Los niveles de iluminación media se obtienen en el suelo.

Los coeficientes de reflexión utilizados son: suelo de ladrillo 20%, techo grisáceo 50%, cerramiento de vidrio 30%. La transmisión del vidrio considerada ha sido de 70%. Es importante mencionar que para el cálculo de la iluminación natural no se han establecido obstrucciones exteriores; es decir, elementos como edificios adicionales o vegetación, así como tampoco se tomaron en cuenta reflexiones del pavimento exterior. No se considera la radiación directa.

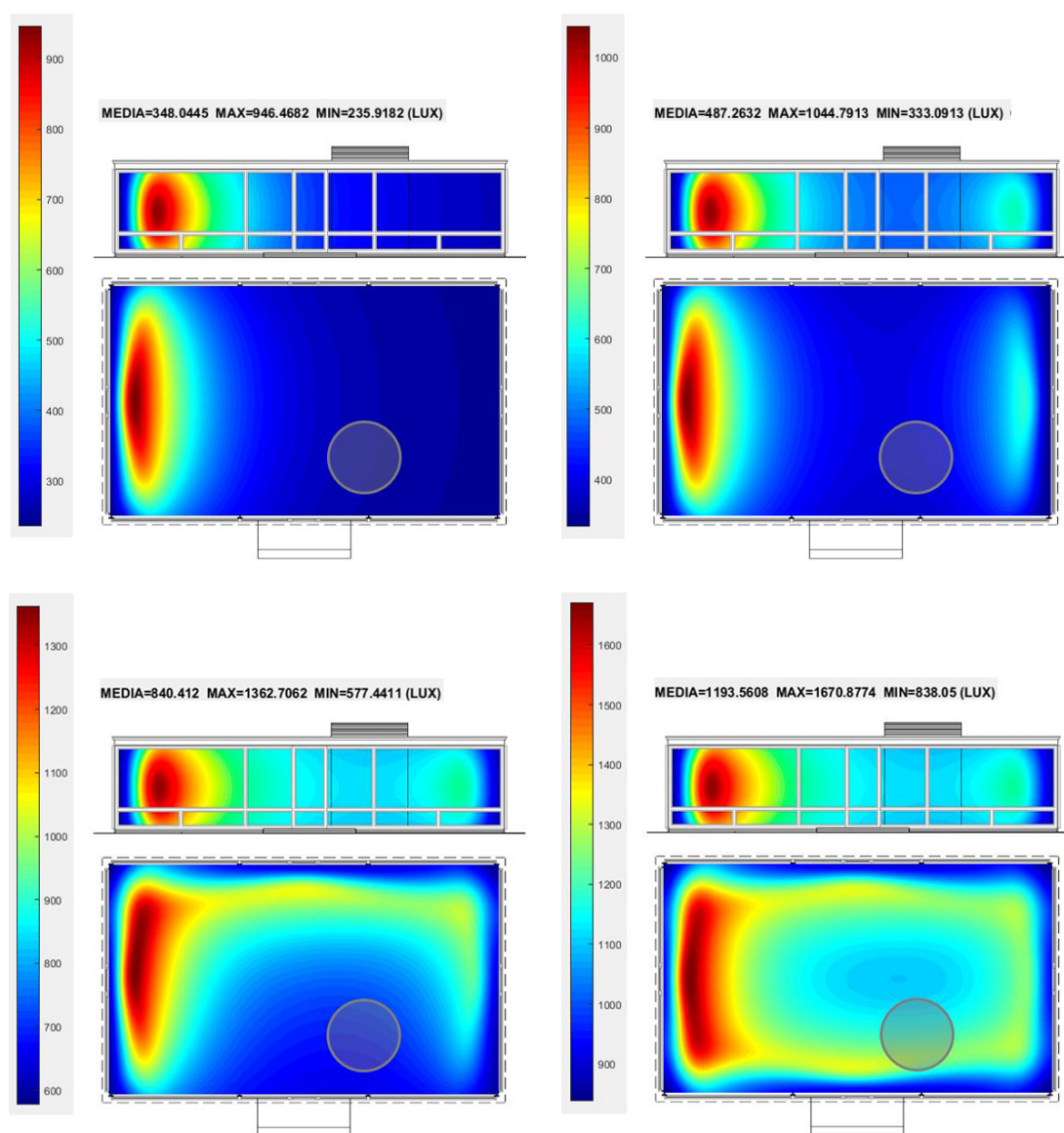


Figura 5: Descomposición del comportamiento de la iluminación natural en un espacio acristalado en sus cuatro fachadas. Preparado por los autores

Los resultados obtenidos para el caso de la iluminación natural permiten observar que los niveles lumínicos más altos están prácticamente pegados al paramento de vidrio, reduciéndose de manera significativa hacia el interior. Para el caso de una sola ventana la distribución luminosa es muy desigual, pero conforme se añaden más ventanas va aumentando la uniformidad lumínica y por lo tanto mejorar el confort visual.

También se observa que los valores de iluminancia son muy elevados, especialmente con las cuatro ventanas, con un valor medio de 1193lx. En este sentido, se plantea una nueva simulación en la que se reduce el espacio acristalado del cerramiento a la mitad simulando un alfeizar opaco perimetral de 1,80m de altura.

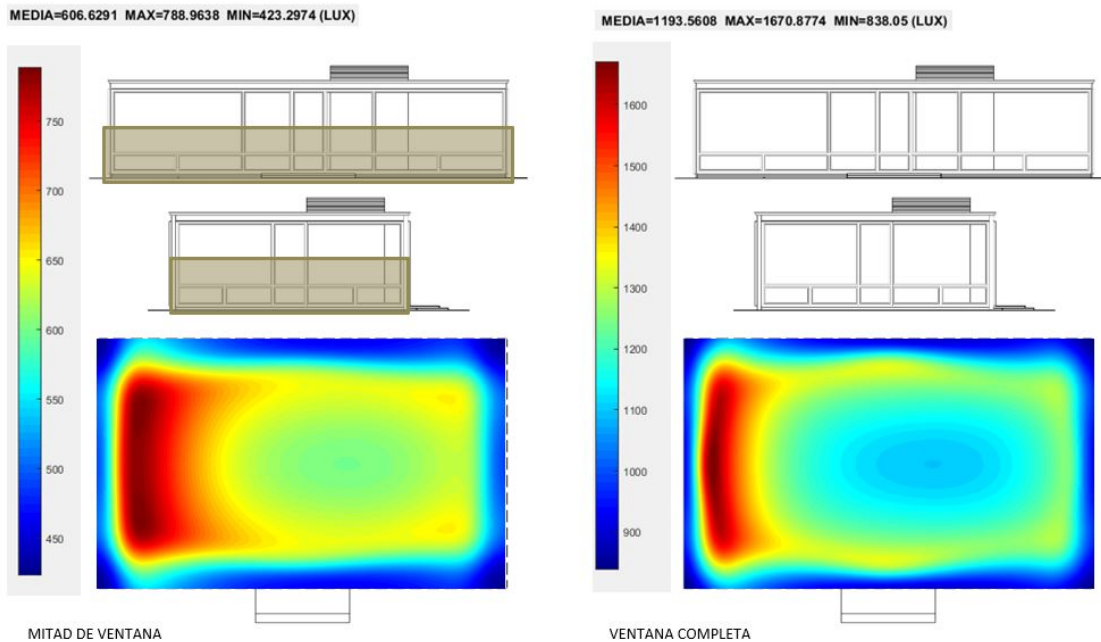


Figura 6: Incidencia del tamaño de huecos en la iluminación. Preparado por los autores

Al reducir el tamaño de los huecos a la mitad observamos cómo también se reduce la iluminancia media a la mitad, de 1193lx con las ventanas al completo pasamos a 606lx con la mitad de ventanas. Evidentemente un paramento acristalado asegura una mejor conexión con el paisaje circundante, pero al reducir el tamaño de la ventana seguimos manteniendo unos niveles luminosos más que razonables, que garantizan un óptimo confort visual.

**Caso 2:** En el segundo caso de estudio se confirma que el alumbrado de interiores con fuentes de iluminación extensa es una alternativa viable a la iluminación tradicional con fuentes lineales. Se toma como modelo un aula docente, ya que tienen una normativa de diseño específica que en España incluye directrices relacionadas tanto con sus dimensiones como con el alumbrado, y se simulan dos condiciones determinadas de iluminación eléctrica: un techo luminoso continuo (superficial) versus tres luminarias lineales adecuadamente dispuestas en techo. Ambas configuraciones lumínicas cuentan en origen con el mismo flujo luminoso (lumen) total.

El aula se define como un espacio diáfano de planta rectangular, ancho 6,90m y largo 8,40m, y cuenta con una altura libre de 3,00m. Los paramentos son lisos con los coeficientes habituales de reflexión y no se ha previsto ningún aporte de iluminación natural. Los coeficientes de reflexión son: suelo de ladrillo 20%, cerramiento 50%, techo 70%. Las luminarias previstas se componen por paneles LED con difusor. El plano de estudio se establece en el suelo. Nivel de iluminancia a conseguir en el aula 500lx (normativa de educación y UNE 12464.1-Norma europea sobre la iluminación para interiores).

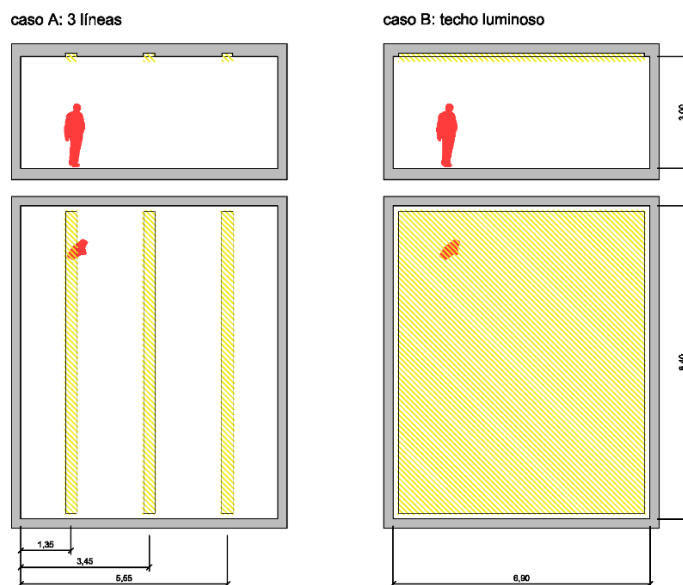


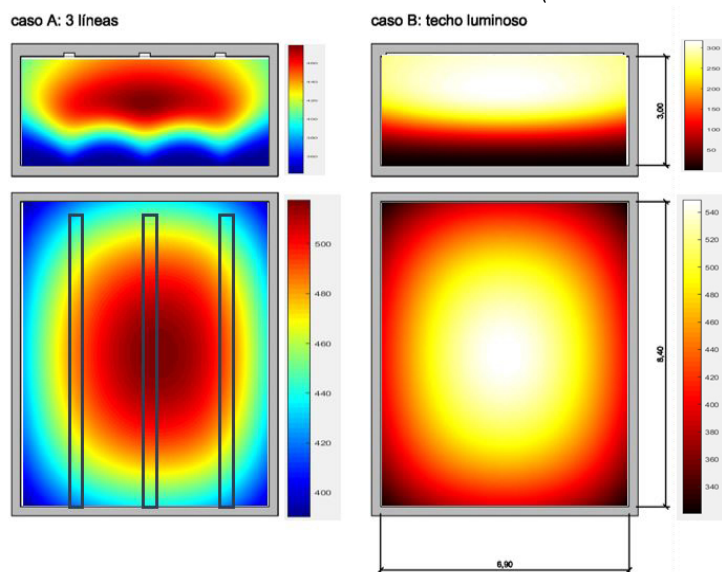
Figura 7: Disposición del alumbrado en el aula. Preparado por los autores

1. Alumbrado lineal. Se proponen tres líneas de alumbrado dispuestas en el techo y orientadas longitudinalmente, paralelas al lado mayor del aula. Las líneas tienen unas dimensiones fijas de 0,30 x 8,40m y 12600lm. En el aula se disponen tres líneas separadas 2,10m de eje a eje y centradas con respecto al eje Y.
2. Alumbrado extenso. Se propone una luminaria superficial en techo de las dimensiones del aula 6,90 x 8,40 a 3 metros de altura. La luminaria tiene 37800lm.

Como podemos observar en la salida de resultados, el techo luminoso puede ser una opción con unos niveles de iluminación similares en el suelo, pero que consigue una distribución luminosa más homogénea en la parte alta de los paramentos. Esta cualidad es particularmente importante en las aulas escolares ya que es donde se sitúan los encerados.

3 líneas (0,30 x 8,40m)  
12600lm cada línea  
5000lx cada línea  
Reflexión .70 .50 .20

superficie (6,90 x 8,40m)  
37800lm superficie  
652.17lx superficie  
Reflexión .30 .50 .20 (reflexión del techo=vidrio translucido 30%)



Em [lx] 466  
Emin [lx] 390

Em [lx] 454  
Emin [lx] 320



Emax [lx] 518  
Emin / Em 0.837

Emax [lx] 550  
Emin / Em 0.706

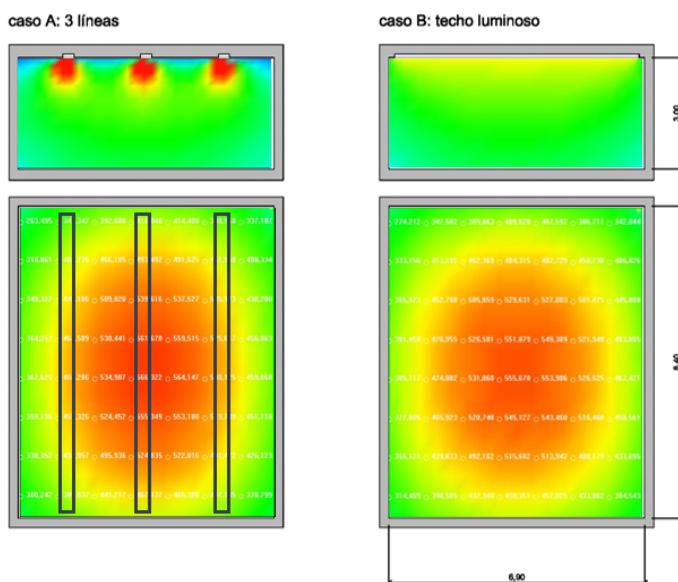
Figura 8: Iluminación superficial vs iluminación lineal. Cálculo con Diana X. Preparado por los autores.

No tenemos constancia de aulas ejecutadas con techo luminoso continuo, si bien ha sido un sistema empleado en un ámbito similar como el de las oficinas de paisaje. Numerosos edificios emblemáticos del movimiento moderno de autores como Mies van der Rohe, Eero Saarinen o SOM cuentan con oficinas iluminadas por fuentes superficiales de techo (curiosamente en casi todos colabora como diseñador de iluminación Richard Kelly, 1910–1977, pionero de la iluminación arquitectónica). Pero sí hay innumerables ejemplos de aulas resueltas con iluminación lineal, pues la normativa de diseño de centros escolares así lo recomienda. Simulaciones de este tipo pueden ayudar a repensar los requisitos normativos.

Con objeto de confirmar los datos obtenidos con otros programas habituales en la arquitectura, se realizan los mismos cálculos con el software Lightscape 3.2 registrándose unos valores similares, por lo que se confirma Diana X es una herramienta válida para el cálculo radiante.

3 líneas (0,30 x 8,40m)  
12600lm cada línea  
5000lx cada línea  
Reflexión .70 .50 .20

superficie (6,90 x 8,40m)  
37800lm superficie  
652.17lx superficie  
Reflexión .30 .50 .20 (reflexión del techo=vidrio translucido 30%)



Em [lx] 452  
Emin [lx] 221  
Emax [lx] 571  
Emin / Em 0.489

Em [lx] 452  
Emin [lx] 230  
Emax [lx] 559  
Emin / Em 0.509

Figura 9: Iluminación superficial vs iluminación lineal. Cálculo con Lightscape 3.2. Preparado por los autores.

## Discusión y Conclusiones

El software Diana X es una herramienta altamente eficiente y compatible con otras utilizadas en la arquitectura e ingeniería, que permite entender en términos de forma arquitectónica el intercambio radiante de energía entre superficies y volúmenes. La aplicación de su método de los factores de forma y los factores de configuración aporta nuevas posibilidades para un mejor aprovechamiento de la radiación solar, lumínica, acústica, en el futuro diseño del espacio arquitectónico.

La concepción de Diana X es universal y permite total versatilidad en la forma, haciendo inteligible algo que es difícil de comprender de otro modo, el funcionamiento real del espacio construido, consolidándose como una herramienta de simulación útil para la toma de decisiones tanto en el diseño como en la investigación de la arquitectura.

- Almodóvar Melendo, J. M. (2003). Desarrollo de Métodos de Simulación Arquitectónica. Aplicación al análisis ambiental del Patrimonio. Colegio de Arquitectos de Sevilla. Fidas.
- Ashdown I. (2001). Radiative Transfer Networks Revisited. Proceedings of IESNA, Paper 8.
- Cabeza Lainez, J.M. (2010). Fundamentos de Transferencia Radiante Luminosa. Ed. Netbiblo.
- Cabeza Lainez, J.M., Almodóvar-Melendo, J.M. (2003). The architect Roberto Rivero and day-lighting research. PLEA 2003. Santiago de Chile
- DiLaura D. L. (1999). New procedures for Calculating Diffuse and Non-Diffuse Radiative Exchange Form Factors. Proceedings of ASME.
- Folguera, E., Muros, A. (2013) La iluminación artificial es arquitectura. Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC.
- Moore, F. (1991). Concepts and Practice of Architectural Daylighting. Van Nostrand Reinhold. New York.
- Patrick P. Charles, Charles R. Thomas. (2009). Building performance simulation in undergraduate multidisciplinary education: learning from an architecture and engineering collaboration.
- Petty, M. (2009). "The Edge of Danger": artificial lighting and the dialectics of domestic occupation in Philip Johnson's Glass and Guest Houses.
- William M.C. Lam (1977). Perception and Lighting as Formgivers for Architecture.
- Zambrano, P y Prado L. (2016). Simulación de iluminación natural en oficinas; implicaciones para la eficiencia visual. 2016.
- Ashdown I. (2004). Radiosity: A Programmer's Perspective. John Wiley & Sons Inc. New York, 1994. Available from <http://www.helios32.com>.
- Cabeza Lainez, J.M. (2012). Solar Radiation in buildings, transfer and simulation procedures. Solar Radiation Edited by Elisha B. Babatunde. InTech. Croatia. ISBN 978-953-51-0384-4
- Cabeza Lainez, J.M. (2009) Lighting Features in Japanese Traditional Architecture. In "Lessons from Traditional Architecture". Editors, Yannas, S., Weber, W. Earthscan. London. ISBN 9781844076000
- Higbie, H. H. (1934). Lighting Calculations. John Wiley and Sons. New York.
- Holman, J.P. (1997) Heat Transfer. Mac Graw-Hill. New York.
- Hopkinson, R. G.; Petherbridge, P.; Longmore, J. (1966) Daylighting. London. Heinemann.
- Lambert J. H. (1764). Photometria. sive de mensura et gradibus Luminis, Colorum et Umbrae. Editor. D. DiLaura. IESNA. 2001.
- MacAllister, A. S. (1910). Graphical Solutions of Problems Involving Plane-Surface Lighting Sources. Lighting World 56. No.1356.
- Moon, P. H; Spencer D. E. (1981) The Photoc Field. The MIT Press. Cambridge. Massachusetts.
- Moon, P. H. (1962) The Scientific Basis of Illuminating Engineering. Dover Publications. New York.
- Moore, F. (1991). Concepts and Practice of Architectural Daylighting. Van Nostrand Reinhold. New York.
- Ne'eman, E. (1974) Visual Aspects of Sunlight in Buildings. Lighting Research and Technology. Vol 6. Nº
- Robbins, C. L. (1986). Daylighting. Design and Analysis. Van Nostrand Reinhold. New York.
- Yamauchi, J. (1927). The Light Flux Distribution of a System of Inter-reflecting Surfaces. Researches of the Electro-technical Laboratory. No. 190.Tokyo. (In Japanese).
- Yamauchi, J. (1929). The Amount of Flux Incident to Rectangular Floor through Rectangular Windows. Researches of the Electro-technical Laboratory. No. 250.Tokyo.

Yamauchi, J. (1932). Theory of Field of Illumination



# Potencial de edificaciones residenciales de mediana altura para cumplir estándar de energía neta cero en diferentes climas de Chile

Potential of mid-rise residential buildings to reach net zero energy building standard in different climates of Chile

**Felipe Tori** (Autor principal)

Filiación: Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), Pontificia Universidad Católica de Chile.

Dirección: Av. Vicuña Mackena 4860, Macul, Santiago. CP: 7820436

Correo: [fatori@uc.cl](mailto:fatori@uc.cl)

**Sergio Vera**

Filiación: Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), Pontificia Universidad Católica de Chile.

Dirección: Av. Vicuña Mackena 4860, Macul, Santiago. CP: 7820436

Correo: [svera@ing.puc.cl](mailto:svera@ing.puc.cl)

**Waldo Bustamante**

Filiación: Escuela de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica de Chile

Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), Pontificia Universidad Católica de Chile

Dirección: El Comendador 1916, Providencia, Santiago. CP: 7520245

Correo: [wbustamante@uc.cl](mailto:wbustamante@uc.cl)

**Pablo Sills**

Filiación: Universidad Técnica Federico Santa María

Dirección: Av. España 1680, Valparaíso. CP: 2390123

Correo: [pablo.sills@usm.cl](mailto:pablo.sills@usm.cl)

**Manuscript Code:**

**Date of Acceptance/Reception:**

## Resumen

Los efectos del cambio climático ya se evidencian en gran parte de la superficie de la Tierra y a medida que avanza el tiempo, estos fenómenos son más repetitivos y catastróficos. La principal causa de este fenómeno son las enormes emisiones de gases de efecto invernadero, que proviene principalmente de la combustión de combustibles fósiles. Las edificaciones, a nivel mundial, generan un tercio de los gases efecto invernadero y consumen aproximadamente el 32% de la energía total consumida a nivel mundial. Dentro de las principales estrategias que están utilizando los países involucrados en la reducción del consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero se encuentran las edificaciones energía neta cero. El término "Edificio Energía Neta Cero (NZEB)" se refiere a una edificación que requiere estar conectada a la red eléctrica, en donde la energía anual importada desde la red es igual a la energía anual exportada producida por fuentes renovable. En Chile no hay antecedentes ni estudios que permitan evaluar y comparar el desempeño de las edificaciones residenciales de mediana altura para alcanzar el estándar NZEB como estrategia de mitigación frente al calentamiento global. El objetivo de la investigación es evaluar el potencial de edificaciones residenciales de mediana altura para ser NZEB en tres zonas climática diferentes (C, D y E de acuerdo a NTM-11) de Chile representados por tres ciudades (La Serena, Santiago, Concepción). Para el comienzo del estudio, se recolectó información de las edificaciones residenciales de mediana altura (3-8 pisos) con permisos de edificación aprobados desde el 2012 en adelante, y mediante una matriz multicriterio se seleccionaron las edificaciones representativas para el estudio. A través de simulación computacional se calcularon los consumos energéticos de las edificaciones representativas para los distintos casos a evaluar tanto en La Serena, Santiago y Concepción. Luego, se optimizó la envolvente térmica, equipos y sistema de iluminación para minimizar el consumo de energía eléctrica de las edificaciones representativas. Por último, se calculó el potencial de estas edificaciones de ser NZEB según la zona climática evaluada y su diseño optimizado. Los resultados muestran que las edificaciones tienen un potencial NZEB cercano al 93% para La Serena y Santiago; y 85% para Concepción. Las edificaciones residenciales de mediana altura en Chile tienen un alto potencial de ser NZEB; sin embargo, hay que buscar nuevas estrategias para reducir el consumo o aumentar la producción energética mediante fuentes renovables.

**Palabras clave:** Edificaciones energía neta cero; Edificaciones residenciales de mediana altura; Simulaciones energéticas.

## Introducción

El término “calentamiento global” se refiere al aumento de temperatura en la atmósfera y el océano de la superficie terrestre. Según Hansen et al. (2010) la temperatura media global registra un aumento exponencial desde 1910 en adelante. Sin embargo, estos aumentos de temperatura no son iguales para toda la superficie terrestre y dependen de su ubicación geográfica. El rango de evidencia publicada indica que los daños provocados por el cambio climático son significativos y se incrementarán con el tiempo (IPCC, 2007). El consumo energético en edificios está cercano al 40% del total en Estados Unidos y la Unión Europea (Cao, Dai, & Liu, 2016).

El concepto Edificación Energía Neta Cero (NZEB) se alude a una edificación conectada a la red eléctrica, en donde la energía anual importada desde la red es igual a la energía anual exportada producida por fuentes renovable (Jung, Paiho, Shemeikka, Lahdelma, & Airaksinen, 2018). Según Albadry et al. (2017), los principales aspectos para alcanzar NZEB son: reducir el consumo energético al mínimo, modificar la aislación térmica de la envolvente y generar energía mediante fuentes renovables. Las Edificaciones Energía Neta Cero son una solución real para la mitigación de las emisiones de CO<sub>2</sub> y reducir el uso de energía en el sector de las edificaciones (Marszal et al., 2011). El principal objetivo de este trabajo es calcular el potencial de edificaciones residenciales de mediana altura representativas para alcanzar el estándar NZEB en tres distintos climas de Chile.

## Estado del arte del problema

Mediante políticas públicas enfocadas a múltiples escalas (internacional, nacional y sub-nacional) se puede responder al cambio climático promoviendo la adaptación y la mitigación. Esto tiene que complementarse con estudios científicos y distintas opciones de financiamiento que promuevan su implementación (IPCC, 2014). Para el caso de las edificaciones, la Unión Europea ha creado la Directiva de Eficiencia Energética en Edificios (EPBD), principal norma Europea enfocada en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, consumo energético, eficiencia energética y producción de energía a través de fuentes renovables (EU, 2010). En Chile no hay políticas públicas dirigidas a desarrollar edificaciones NZEB y estamos atrasados al menos 30 años en este ámbito. Por ejemplo, faltan estudios que evalúen el potencial de edificaciones residenciales de mediana altura para cumplir el estándar NZEB como estrategia para reducir el consumo energético en distintos climas de Chile.

## Metodología

Definición de edificaciones residenciales representativas de mediana altura

Para encontrar las edificaciones residenciales de mediana altura (3-8 pisos) representativas para el estudio, se realizó una revisión de los permisos de edificación otorgados por las municipalidades desde el 2012 en adelante para las comunas de Quilicura, San Joaquín, Pudahuel y Quinta Normal, pertenecientes a la Región Metropolitana de Chile. Esta información se definió las edificaciones que cumplan con el alcance de la investigación y establecer un grupo reducido de edificaciones residenciales de mediana altura (3-8 pisos) para revisar planos y especificaciones técnicas en detalle. Mediante una matriz multi criterio se seleccionarán dos edificaciones representativas que serán simuladas en las próximas etapas de la investigación. Los parámetros que se consideraron para la definir la representatividad de las edificaciones son los siguientes:

- Geometría regular
- Vacíos
- Materialidad muros exteriores
- Window to Wall Ratio (WWR)
- N° de departamentos por piso
- Superficie disponible techumbre
- N° de tipos de departamentos

Las edificaciones de mediana altura que se seleccionaron para el estudio son: A y B. A es una edificación de 5 pisos ubicada en la comuna de San Joaquín con una superficie edificada de 1262 m<sup>2</sup>. B es una edificación de 5 pisos ubicada en la comuna de Quilicura y tiene una superficie edificada de 1102 m<sup>2</sup>. A y B corresponden a edificaciones de viviendas sociales.

En el software *SketchUp* se realizó un modelo 3D para cada vivienda según sus planos arquitectónicos respectivos. Este modelo se utilizó para simulaciones energéticas en las siguientes etapas.

## Cálculo consumo eléctrico

El consumo eléctrico de cada edificación se definió como la suma de los consumos de climatización por enfriamiento y calefacción, , agua caliente sanitaria, iluminación y electrodomésticos. Los sistemas constructivos de la envolvente considerados en las viviendas se definieron según los requerimientos de la norma NTM-11. Cada ciudad tiene distintos requerimientos dependiendo de su ubicación geográfica. La Serena (clima desértico frío) corresponde a la zona C, Santiago (clima semiárido frío) a la zona D y Concepción (clima mediterráneo con verano frío) a la zona E. A continuación, se muestran las características de los elementos de la envolvente que cumplen con los requisitos de la normativa NTM-11.

**Tabla 1.** Características elementos envolvente según ciudad.

| Ciudad     | Elemento envolvente |                |                |                            |
|------------|---------------------|----------------|----------------|----------------------------|
|            | Muros               | Techo          | Radier         | Ventana                    |
| La Serena  | Hormigón 20 cm      | Hormigón 20 cm | Hormigón 20 cm | U = 5.7 W/m <sup>2</sup> K |
|            | EPS 40 mm           | EPS 80 mm      | EPS 10 mm      | SHGC = 0.85                |
| Santiago   | Hormigón 20 cm      | Hormigón 20 cm | Hormigón 20 cm | U = 5.7 W/m <sup>2</sup> K |
|            | EPS 60 mm           | EPS 100 mm     | EPS 10 mm      | SHGC = 0.85                |
| Concepción | Hormigón 20 cm      | Hormigón 20 cm | Hormigón 20 cm | U = 3 W/m <sup>2</sup> K   |
|            | EPS 70 mm           | EPS 120 mm     | EPS 10 mm      | SHGC = 0.75                |

EPS: Poliestireno expandido

Las simulaciones energéticas se realizaron en *EnergyPlus*. Las cargas internas son obtenidas de la norma neozelandesa de aislación térmica para casa y edificaciones pequeñas "*NZS 4218:2009 Thermal Insulation – Housing and Small Buildings*". A continuación, se presentan los principales valores de las cargas internas consideradas en la modelación:

- Control de temperatura
  - o Temperatura calefacción: 20°C
  - o Temperatura enfriamiento: 25°C
- Sistema climatización
  - o COP sistema calefacción: 3
  - o COP sistema enfriamiento: 3
- Ocupantes
  - o Carga interna ocupantes: 3 W/m<sup>2</sup>
- Equipamiento interior
  - o Consumo iluminación: 7.12 W/m<sup>2</sup>
  - o Consumo electrodomésticos: 17.38 W/m<sup>2</sup>
- Agua caliente sanitaria
  - o Temperatura salida: 60°C
  - o Consumo: 28 litros/día·persona
- Infiltraciones (según NTM-11)
  - o La Serena: 9 ACH a 50 Pa, Santiago: 8 ACH a 50 Pa y Concepción: 8 ACH a 50 Pa

## Optimización del consumo eléctrico mediante medidas de eficiencia energética

Para optimizar el consumo eléctrico de las viviendas con el objetivo de minimizar su consumo, se utilizó el software *GenOpt* que permite realizar optimizaciones en software de simulación energética como *EnergyPlus*. Como medidas de eficiencia energética se consideraron distintas tecnologías para la iluminación, electrodomésticos más eficientes, aumentar la aislación térmica de la envolvente, orientación, SHGC y valor-U de la ventana. A continuación, se muestran los rangos de las variables que se evaluaron en la simulación:

- Espesor EPS muros
  - o La Serena -> Valor min: 40 mm, Valor max: 60 mm
  - o Santiago -> Valor min: 60 mm, Valor max: 90 mm
  - o Concepción -> Valor min: 70 mm, Valor max: 110 mm

- Espesor EPS techo
  - o La Serena -> Valor min: 80 mm, Valor max: 120 mm
  - o Santiago -> Valor min: 110 mm, Valor max: 150 mm
  - o Concepción -> Valor min: 120 mm, Valor max: 180 mm
- Espesor EPS radier
  - o Todos los casos-> Valor min: 10 mm, Valor max: 20 mm
- Tecnologías de iluminación
  - o Incandescentes: 7.12 W/m<sup>2</sup>
  - o Fluorescentes compactas: 4.14 W/m<sup>2</sup>
  - o LED: 3.43 W/m<sup>2</sup>
- Tecnologías de electrodomésticos
  - o Convencionales: 17.38 W/m<sup>2</sup>
  - o A++: 11.02 W/m<sup>2</sup>
- Orientación
  - o Todos los casos-> Valor min: 0°, Valor max: 360°
- Ventanas
  - o SHGC-> Valor min: 0.05, Valor max: 0.85
  - o Valor U-> Valor min: 1.6 W/m<sup>2</sup>\*°K, Valor max: 5.7 W/m<sup>2</sup>\*°K

#### Optimización del sistema fotovoltaico y potencial NZEB

Al alcanzar el mínimo consumo eléctrico a través de las distintas medidas de eficiencia energética optimizadas, se optimizó las fuentes de energía renovables con el fin de que edificaciones A y B sea energía neta cero. En esta investigación se evaluaron la incorporación de paneles fotovoltaicos en el techo como fuente de energía renovable. El objetivo de la optimización es encontrar el mínimo valor de área requerida por paneles fotovoltaicos con el requisito de cumplir el estándar NZEB. El estándar NZEB se cumple al tener un neto igual a cero entre la energía importada desde la red y la exportación de energía producida por fuentes renovables. El potencial NZEB se calculará mediante la siguiente fórmula (1):

$$\text{Potencial NZEB: } \frac{\text{Energía exportada a la red}}{\text{Energía importada desde la red}} (\%) \quad (1)$$

Tener un potencial NZEB menor al 100% significa que con la superficie de paneles fotovoltaicos, restringida al máximo de superficie de techo, no se alcanza a tener un neto igual a cero y se importa más energía de la que se exporta. Tener un potencial NZEB del 100% significa que esa edificación cumple con el estándar NZEB y el balance energético anual es igual a cero.

## Resultados

A continuación, se presentan los modelos 3D para cada una de las edificaciones residenciales representativas A y B. En la Tabla 2 se muestra el consumo eléctrico anual del caso base para cada edificio en cada ciudad. Los principales consumos en las edificaciones residenciales de mediana altura son los electrodomésticos y el agua caliente sanitaria. Ambas categorías utilizan aproximadamente un 65–70% del consumo eléctrico total de la edificación. Esto se debe a que el sistema de climatización usado presenta COP de 3 tanto para calefacción como para enfriamiento. La Tabla 3 presentan los resultados del consumo eléctrico para el caso base, el consumo eléctrico del caso optimizado y el porcentaje de reducción que se alcanzó con las medidas consideradas.

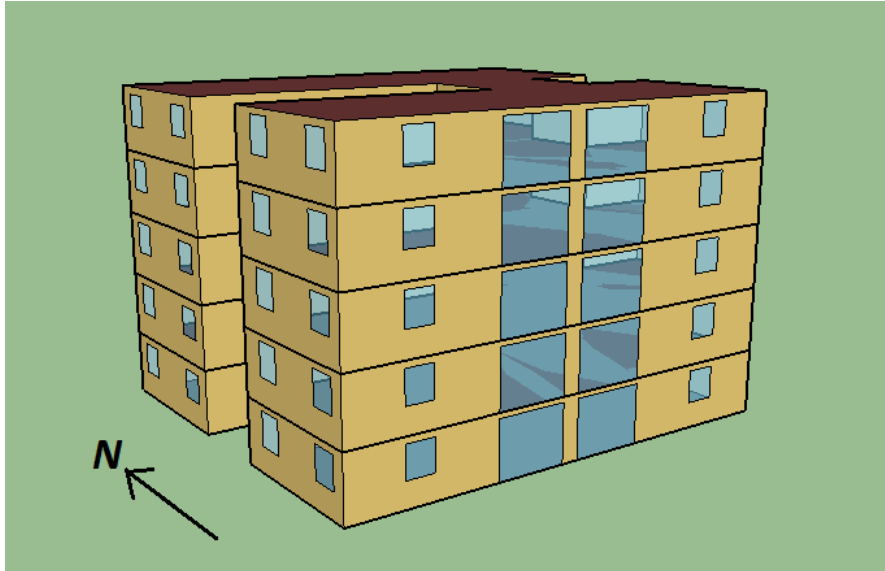


Figura 1. Modelo 3D edificación representativa A.

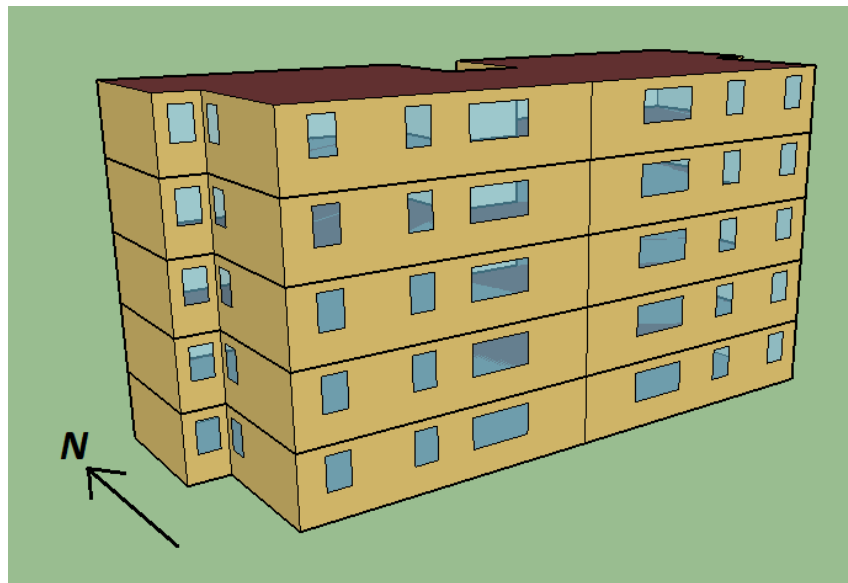


Figura 2. Modelo 3D edificación representativa B.

Tabla 2. Consumo eléctrico anual caso base por tipo de uso

| Ciudad     | Edificación | Consumo eléctrico anual kWh/(m <sup>2</sup> ·año) |                    |                         |             |              | Total |
|------------|-------------|---|--------------------|-------------------------|-------------|--------------|-------|
|            |             | Sistema iluminación                               | Electro-domésticos | Agua caliente sanitaria | Calefacción | Enfriamiento |       |
| La Serena  | A           | 10.45   | 25.5               | 15.90                   | 5.37        | 3.37         | 60.59 |
|            | B           | 10.45   | 25.5               | 15.90                   | 7.65        | 2.43         | 61.93 |
| Santiago   | A           | 10.45   | 25.5               | 15.90                   | 8.48        | 9.18         | 69.51 |
|            | B           | 10.45   | 25.5               | 15.90                   | 9.50        | 5.40         | 66.75 |
| Concepción | A           | 10.45   | 25.5               | 15.90                   | 6.55        | 3.54         | 61.94 |
|            | B           | 10.45   | 25.5               | 15.90                   | 9.29        | 2.34         | 63.48 |

**Tabla 3.** Consumo eléctrico anual caso base y optimizado por ciudad.

| Ciudad     | Edificación | Consumo eléctrico anual kWh/(m2 año) |                  |           |
|------------|-------------|--------------------------------------|------------------|-----------|
|            |             | Total caso base                      | Total optimizado | Reducción |
| La Serena  | A           | 60.59                                | 44.13            | 27%       |
|            | B           | 61.93                                | 45.47            | 27%       |
| Santiago   | A           | 69.51                                | 49.66            | 29%       |
|            | B           | 66.75                                | 48.98            | 27%       |
| Concepción | A           | 61.94                                | 46.80            | 24%       |
|            | B           | 63.48                                | 46.84            | 26%       |

El consumo eléctrico anual se podría reducir en aproximadamente un 28% con respecto al caso base al utilizar estrategias de eficiencia energética optimizadas en las edificaciones. Los menores consumos se registran en la ciudad de La Serena principalmente por el menor uso de los sistemas de climatización para mantener la temperatura de confort. La ciudad de Santiago es la que presenta un mayor consumo debido a las altas temperaturas (mayores a 30°C) que se registran en verano y las bajas temperaturas en invierno (cercas a 0°C).

En la Tabla 4 se observan los parámetros de la optimización que permitieron reducir al mínimo el consumo eléctrico.

**Tabla 4.** Parámetros para consumo mínimo.

| Ciudad     | Edificación | Parámetros para el caso óptimo |                  |                   |                        |                                 |         |      |
|------------|-------------|--------------------------------|------------------|-------------------|------------------------|---------------------------------|---------|------|
|            |             | Esesor EPS muros               | Esesor EPS techo | Esesor EPS radier | Sistema de Iluminación | Eficiencia de Electrodomésticos | Valor U | SHGC |
| La Serena  | A           | 60 mm                          | 120 mm           | 20 mm             | LED                    | A++                             | 1.6     | 0.75 |
|            | B           | 60 mm                          | 120 mm           | 20 mm             | LED                    | A++                             | 1.6     | 0.85 |
| Santiago   | A           | 90 mm                          | 150 mm           | 20 mm             | LED                    | A++                             | 1.6     | 0.55 |
|            | B           | 90 mm                          | 150 mm           | 20 mm             | LED                    | A++                             | 1.6     | 0.75 |
| Concepción | A           | 110 mm                         | 180 mm           | 20 mm             | LED                    | A++                             | 1.6     | 0.75 |
|            | B           | 110 mm                         | 180 mm           | 20 mm             | LED                    | A++                             | 1.6     | 0.85 |

Para todas las ciudades se seleccionaron los espesores máximos de aislación de todos los elementos de la envolvente; sistemas de iluminación y electrodomésticos con el menor consumo eléctrico, como es el caso de los LED y equipos A++, respectivamente; mientras que el SHGC de las ventanas es el único parámetro que varía según la edificación y la ciudad evaluada. A continuación, se presenta el potencial de ser NZEB para cada caso y la superficie de paneles requerida para cumplir el respectivo estándar.

**Tabla 5.** Potencial NZEB edificaciones representativas.

| Ciudad     | Edificación | Superficie disponible (m2) | Superficie utilizada (m2) | Potencia nominal (kW) | Energía demandada (MWh) | Energía producida (MWh) | Potencial NZEB (%) |
|------------|-------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|
| La Serena  | A           | 251                        | 251                       | 38.35                 | 55.69                   | 52.20                   | 94%                |
|            | B           | 220                        | 220                       | 33.62                 | 50.10                   | 45.75                   | 91%                |
| Santiago   | A           | 251                        | 251                       | 38.35                 | 62.67                   | 58.39                   | 93%                |
|            | B           | 220                        | 220                       | 33.62                 | 53.97                   | 51.18                   | 95%                |
| Concepción | A           | 251                        | 251                       | 38.35                 | 59.06                   | 50.21                   | 85%                |
|            | B           | 220                        | 220                       | 33.62                 | 51.61                   | 44.01                   | 85%                |



Para todos los casos se observa que las edificaciones de mediana altura A y B no cumplen con el estándar NZEB aunque tienen toda la superficie de techumbre utilizada con paneles fotovoltaicos. Para La Serena y Santiago el potencial NZEB de estas viviendas varía entre 91% y 99%, mientras que para Concepción se reduce a un 85% debido a la menor radiación incidente.

## Discusión y Conclusiones

Varias estrategias se utilizaron para reducir el consumo eléctrico de las edificaciones residenciales de mediana altura respecto al estándar de la NTM-11. Se logró reducir en aproximadamente un 28% con respecto al caso base. Las edificaciones residenciales de mediana altura están muy cercanas al cumplir el estándar NZEB (85-94%) mediante medidas de eficiencia energética y producción fotovoltaica. Para lograr cumplir el estándar NZEB se deberían estudiar más estrategias para reducir el consumo eléctrico, reducir el número de pisos de la vivienda para tener la misma superficie de techo y requerir menor energía, arquitectónicamente incrementar la superficie de techo, o incluso evaluar la incorporación de paneles fotovoltaicos en las fachadas verticales.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento del Proyecto de Investigación Interdisciplina I15035, de la Vicerectoría de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Chile, y el apoyo del proyecto CONICYT/FONDAP/15110020 (CEDEUS).

## Referencias

- Albadry, S., Tarabieh, K., & Sewilam, H. (2017). Achieving Net Zero-Energy Buildings through Retrofitting Existing Residential Buildings Using PV Panels. *Energy Procedia*, 115, 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.018>
- Cao, X., Dai, X., & Liu, J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy & Buildings*, 128, 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>
- Department of Building and Housing. (2009). *Thermal Insulation – Housing and Small Buildings - NZS 4218:2009*.
- EU. (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Union*, 13–35. [https://doi.org/doi:10.3000/17252555.L\\_2010.153.eng](https://doi.org/doi:10.3000/17252555.L_2010.153.eng)
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2010). Global surface temperature change. *Rev. Geophys.*, 48(4), RG4004. <https://doi.org/10.1029/2010RG000345.1>.INTRODUCTION
- IPCC. (2007). Climate change 2007 : impacts, adaptation and vulnerability : Working Group II contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. *Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report*, 1(July), 976. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0015br>
- IPCC. (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers. *Ipcc*, 31. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Jung, N., Paiho, S., Shemeikka, J., Lahdelma, R., & Airaksinen, M. (2018). Energy performance analysis of an office building in three climate zones. *Energy and Buildings*, 158, 1023–1035. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.030>
- Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 43(4), 971–979. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022>
- NTM 11/3. (2014). Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento ambiental de las edificaciones . Parte 3 : Calidad del aire interior.

# Desempeño térmico de ventanas doble vidrio que incorporan materiales de cambio de fase

Thermal performance of double clear glazing windows incorporating phase change materials

## Daniel Uribe

Filiación: Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), Pontificia Universidad Católica de Chile.

Dirección: Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago. CP 7820436.

Correo: dnuribe@uc.cl

## Sergio Vera

Filiación: Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), Pontificia Universidad Católica de Chile.

Dirección: Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago. CP 7820436.

Correo: svera@ing.puc.

## Nicolás Benavente

Filiación: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Dirección: Beauchef 850, Santiago. CP: 8320000.

Correo: nicolas.benavente.m@ug.uchile.cl

## Waldo Bustamante

Filiación: Escuela de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica de Chile

Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), Pontificia Universidad Católica de Chile.

Dirección: El Comendador 1916, Providencia, Santiago. CP 7520245.

Correo: wbustamante@uc.cl

**Manuscript Code:** 024

**Date of Acceptance/Reception:** 27-09-2018/24-08-2018

## Resumen

Los edificios de oficina con grandes porcentajes de fachada vidriada poseen altas cargas de enfriamiento, debido a las ganancias solares que incluso en la temporada de invierno son altas en la zona central de Chile. Los materiales de cambio de fase (PCMs por sus siglas en inglés), cuando se utilizan en la cavidad de ventanas con doble vidrio, tienen la capacidad de mejorar el desempeño energético de los edificios porque controlan las ganancias solares que ingresan al interior y reducen las cargas de calefacción y enfriamiento. Por otro lado, herramientas de simulación de desempeño energético de edificios, como EnergyPlus, no incluyen modelos de transferencia de calor de elementos que incluyan capas de PCM en elementos transparentes, sino que sólo tienen modelos de transferencia de calor de elementos opacos que incluyen PCM. Como consecuencia, el principal objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo numérico de transferencia de calor para ventanas con vidrio doble que incorporan PCM en la cavidad de aire, el cual en el futuro se espera acoplar con EnergyPlus. Para desarrollar este modelo, el calor sensible y latente del material de cambio de fase es modelado numéricamente en MATLAB. Particularmente, el calor latente durante el cambio de fase se modela aumentando el valor del calor específico del material. Este modelo es usado para evaluar el impacto del PCM en la temperatura interior de la ventana. Se estudia un módulo de oficina de dimensiones 6.0 m (ancho) x 8.0 m (profundidad) x 3.0 m (alto) ubicado en tres ciudades de Chile: Copiapó, Santiago y Concepción. Los PCMs evaluados son ceras de parafinas de la empresa Rubitherm®. Particularmente, se evalúan las ceras RT12, RT25, RT25HC, RT28HC, RT31 y RT35, en donde RT corresponde a la línea del producto, el número corresponde a la temperatura de cambio de fase (solidificación/fusión) y HC indica que el material tiene un calor latente mayor, el que normalmente pasa de tener entre 150 y 170 kJ/kg a valores entre 230 y 250 kJ/kg. El desempeño de estos PCMs es comparado con el uso de una ventana con doble vidrio claro con cavidad de aire. Los resultados de esta investigación muestran que los PCMs que obtuvieron el mejor desempeño térmico son el RT25 y RT25HC. Ambos logran mantener la temperatura interior de la ventana cercana al rango de temperatura de confort de los ocupantes.

**Palabras claves:** Materiales de cambio de fase; Desempeño térmico ventana; Edificios de oficina; Modelación numérica.

## Introducción

La zona central de Chile se caracteriza por tener alta radiación y temperatura exterior durante 6 a 8 meses del año. Por otro lado, los edificios de oficina con grandes porcentajes de fachada vidriada poseen altas cargas de enfriamiento

debido a las ganancias solares, que incluso en la temporada de invierno son altas (Bustamante, Vera, Prieto, & Vásquez, 2014).

Los materiales de cambio de fase (PCMs, por sus siglas en inglés) corresponden a materiales que cambian de fase de líquido a sólido o viceversa a temperatura ambiente, y tienen la capacidad de almacenar grandes cantidades de energía cuando ocurre el cambio de fase. Estos pueden ser del tipo orgánico e inorgánico, como sales minerales, parafinas, etc. Este tipo de materiales tienen la capacidad de reducir las cargas de enfriamiento cuando están incorporados a las fachadas opacas de edificios (Ilaria, Lorenza, Goia, & Serra, 2018). Los edificios de oficinas de planta abierta usualmente tienen un bajo porcentaje de superficies opacas en la fachada. Por lo tanto, esta es una oportunidad para utilizar ventanas rellenas con PCM para controlar las ganancias solares y transmisión de luz natural y reducir los picos de energía de calefacción y enfriamiento (Giovannini, Goia, Verso, & Serra, 2017; Silva, Vicente, & Rodrigues, 2016).

EnergyPlus permite simular la transferencia de calor a través de elementos opacos (i.e. muros, techumbres y pisos) que integran PCMs (Tabares-Velasco, Christensen, & Bianchi, 2012). Sin embargo, EnergyPlus no permite utilizar materiales de cambio de fase en elementos transparentes de la envolvente del edificio. Como consecuencia, el principal objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo numérico de transferencia de calor para ventanas con vidrio doble que incorporan PCM en su cavidad, el cual en el futuro se espera acoplar con EnergyPlus y utilizarlo para determinar el desempeño térmico de una ventana doble con PCM en tres climas.

## Estado del arte del problema

Diferentes modelos de transferencia de calor de ventanas con PCM están disponibles en el estado del arte, los cuales tienen el potencial de ser acoplados a un software de modelación energética. En particular, Goia et al. (2012) desarrolló un modelo de transferencia de calor 1D para ventanas rellenas con PCM que considera el intercambio de calor por radiación de onda larga y onda corta, conducción y convección. El modelo fue validado a través de un experimento a escala real comparando mediciones de la temperatura superficial de la ventana y flujo de calor a través de ella.

Por otro lado, Liu et al. (2016) desarrolló un modelo considerando la absorción de las diferentes capas de la ventana, y transferencia de calor mediante conducción, convección y radiación de onda larga y onda corta. Ellos validaron su modelo mediante la comparación entre mediciones de la temperatura superficial de la ventana en un laboratorio a escala real y los resultados obtenidos con el modelo.

A partir de esto, el principal objetivo de este artículo es desarrollar un modelo numérico de transferencia de calor a través de ventanas doble vidrio hermetico cuya cavidad de aire es rellena con PCM. Este modelo se basa en los trabajos de Goia et al. (2012), Liu et al. (2016), Goia et al. (2015) y Tabares-Velasco et al. (2012). Para llevar a cabo el desarrollo del modelo, las propiedades de la ventana y el calor sensible y latente del PCM fueron modeladas en MATLAB. El modelo se utilizó para determinar la mejor opción de PCM que mejora el desempeño térmico de la ventana con PCM en tres climas de Chile asociados a las ciudades de Copiapó, Santiago y Concepción.

## Metodología

### General

El proceso para determinar el desempeño térmico de una ventana con doble vidrio rellena con PCM consiste en tres etapas:

- Selección del PCM a evaluar.
- Cálculo de la temperatura interior de la ventana utilizando un modelo de transferencia de calor.
- Calcular la diferencia de la temperatura interior de la ventana cuando está rellena con PCM y con aire.

Las secciones siguientes se presentan el modelo del módulo de oficina evaluado, el clima de las ciudades evaluadas, la selección de los PCM evaluados y el modelo de transferencia de calor desarrollado para determinar el desempeño térmico de la ventana con PCM.

### Modelo del Módulo de Oficina

El módulo de oficina considerado en este estudio corresponde a una oficina de dimensiones 6.0 m (ancho) x 8.0 m (profundidad) x 3.0 m (alto), como se observa en la Figura 1. El módulo tiene una fachada vidriada expuesta a las condiciones exteriores, con una ventana de 3.0 m (ancho) x 2.0 m (alto). Los otros muros, cielo y piso se consideran adiabáticos, por lo tanto, la transferencia de calor entre el ambiente interior y exterior ocurre solo a través de la fachada vidriada. La ventana corresponde a un doble vidrio claro de 4 mm cada uno y una cavidad de 12 mm. Cuando la cavidad de la ventana está rellena con aire, el sistema presenta una transmitancia térmica de 2.70 W/m·K. El módulo, además, considera un sistema de climatización ideal con un termostato de calefacción de 20°C y de enfriamiento de 25°C. Las cargas internas de la oficina no se consideran debido a que el objetivo de este estudio considera solo la evaluación de la transferencia de calor a través de la ventana.

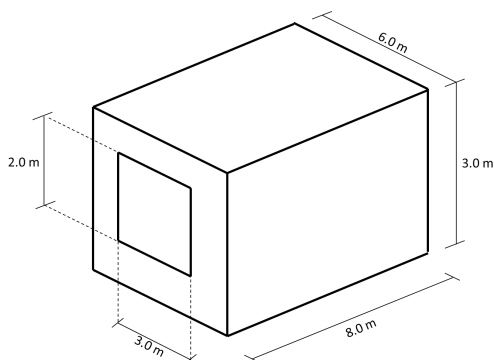


Figura 12. Módulo de oficina evaluado. Fuente propia.

### Clima de las Ciudades Evaluadas

El módulo de oficina se localiza en tres ciudades representativas del Chile: Copiapó, Santiago y Concepción. Copiapó tiene temperatura máxima anual de 30.4°C y temperatura mínima anual de -1.2°C. La temperatura media del aire anual es de 15.5°C. De acuerdo a la clasificación de Köppen-Geiger, Copiapó tiene un clima árido frío (BWk). Santiago tiene temperatura máxima anual de 33.2°C, la que ocurre en diciembre, y temperatura mínima anual de -6°C en agosto. La temperatura media del aire anual es de 14.4°C. De acuerdo a la clasificación de Köppen-Geiger, Santiago se clasifica como clima semiárido (Bsk). Concepción tiene temperatura máxima anual de 29.0°C, la que ocurre en enero, y temperatura mínima anual de -1.0°C en agosto. La temperatura media del aire anual es de 12.9°C. De acuerdo a la clasificación de Köppen-Geiger, Concepción tiene un oceánico mediterráneo (Csb).

### Selección del PCM

Los PCMs evaluados corresponden a ceras de parafina de la línea RT de la empresa Rubitherm®. La temperatura de cambio de fase varía entre 12°C y 35°C basado en el Reporte Interno Número 1 del proyecto SOLTREN (Shipkovs et al., 2018). La temperatura de cambio de fase y calor latente se presentan en la Tabla 1.

Table 11. PCMs esvaluados. Fuente: Rubitherm®.

| RT     | Temperatura de cambio de fase (°C) | Calor latente (kJ/kg) |
|--------|------------------------------------|-----------------------|
| RT12   | 12                                 | 155                   |
| RT25   | 25                                 | 170                   |
| RT25HC | 25                                 | 230                   |
| RT28HC | 28                                 | 250                   |
| RT31   | 31                                 | 165                   |
| RT35   | 35                                 | 160                   |

### Modelo Numérico

El modelo de transferencia calor ha sido desarrollado en base a los estudios previos de Goia et al. (2012), Liu et al. (2016), Goia et al. (2015) y Tabares-Velasco et al. (2012). Se trata de un modelo unidimensional que incluye la

transferencia de calor por conducción, convección y radiación de onda larga y onda corta. Los cálculos del modelo se realizana través del método de diferencias finitas de Crank-Nicolson, y la discretización de la ventana considera 2 nodos en cada vidrio y 4 nodos en el espacio entre estos, que puede estar relleno con aire o PCM. El esquema de discretización se muestra en la Figura 2.

Figure 13. Discretización de la ventana. Fuente propia.

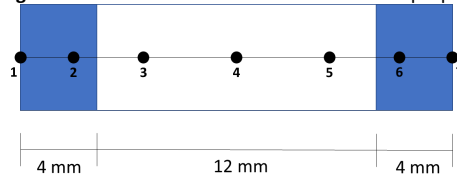


Figura 14. Discretización de la ventana. Fuente propia.

El modelo considera los siguientes supuestos:

- La convección del espacio entre las ventanas es cosiderada cuando se encuentra relleno con aire.
- La convección del espacio entre las ventanas se desprecia cuando este se encuentra relleno con PCM.
- Se considera la absorción de cada capa de la ventana.

La ecuación (1) presenta la ecuación de transferencia de calor a través de la ventana con PCM:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \phi \quad (1)$$

donde  $t$  es el tiempo (s),  $T$  es la temperatura (K),  $\rho$  es la densidad del material ( $\text{kg/m}^3$ ) y  $C_p$  es el calor específico del material ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ),  $k$  es conductividad térmica del material ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) y  $\phi$  es el término que incluye las fuentes de radiación y convección. Para resolver esta ecuación, se aplica el método de diferencias finitas de Crank-Nicolson. Las ecuaciones (2) y (3) representan la discretización del problema.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} \quad (3)$$

donde  $\Delta t$  es el paso de tiempo de las mediciones, 1 min en este estudio;  $\Delta x$  es la discretización espacial (m) y  $T_i^n$  es la temperatura en el nodo  $i$  y tiempo  $n$ . A esta discretización, se le agrega la radiación. Finalmente, a continuación, se presenta la forma matricial de la ecuación a resolver.

$$(I - rA)T^{n+1} = (I + rA)T^n + r(b^n + b^{n+1}) + \phi' \quad (4)$$

$$A = \begin{pmatrix} -2 & 1 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 1 & -2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$b = \begin{pmatrix} q_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ q_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

donde,  $I$  es la matriz identidad,  $A$  es la matriz de la ecuación (5) y  $b$  representan las condiciones de bordes de la ecuación (6).

El modelo numérico fue implementado en MATLAB. Además, un modelo del módulo de oficina fue creado en EnergyPlus y utilizado para calcular los datos de entrada del modelo MATLAB. Las entradas del modelo son la temperatura media del aire interior, la temperatura exterior del aire, las temperaturas de las superficies interiores y exteriores de la ventana, la radiación solar y los coeficientes de convección interior y exterior.

El cambio de fase se modela variando el valor del calor específico del PCM dependiendo de la temperatura a la que se encuentre. Esto se hace según indica Tabares-Velasco et al. (2012), quienes realizan el cálculo a través de la variación de la entalpía con respecto a la temperatura.

## Resultados

Las Figuras 3, 4 y 5 presentan los resultados de temperatura interior de la ventana del módulo de oficina para las 3 ciudades estudiadas: Copiapó, Santiago y Concepción, para una semana representativa de verano e invierno, y orientación de la fachada vidriada norte y poniente. Se presentan los resultados para la ventana rellena con aire y las parafinas RT12, RT25, RT25HC, RT28HC, RT31 y RT35.

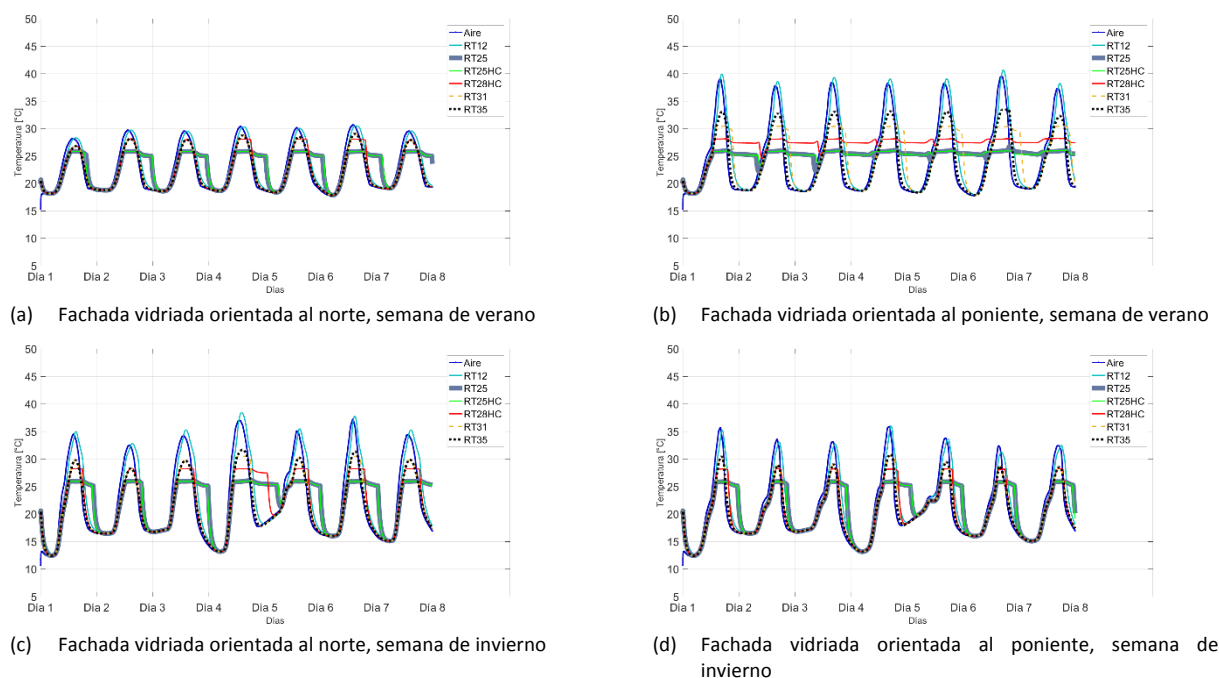


Figura 15. Temperatura interior de la ventana en Copiapó para una semana representativa de verano e invierno.

En las tres ciudades estudiadas, los resultados muestran que los picos de temperaturas diarios cuando la ventana está rellena con parafina están desfasados respecto a los resultados de la ventana rellena con aire, debido a la diferencia entre el calor específico del aire y el PCM. Además, la ventana rellena con la parafina RT12 siempre se encuentra en estado líquido y por ende posee un comportamiento similar a la ventana rellena con aire, porque la temperatura de la ventana generalmente es mayor a 12°C en las tres ciudades y orientaciones evaluadas.

En el caso de Copiapó (Figura 3), las parafinas RT25, RT25HC y RT28 utilizadas en la fachada norte y poniente, cambian de fase cada día generalmente, manteniendo la temperatura interna de la ventana cercana a la temperatura de cambio de fase del PCM. Durante invierno, las tres parafinas son capaces de mantener la temperatura interior de la ventana cercana a la temperatura de cambio de fase, tanto para la orientación norte como para la orientación poniente de la fachada vidriada. Finalmente, la parafina RT31 y RT35 prácticamente nunca cambian de fase.

En Santiago (Figura 4), las parafinas RT25, RT25HC y RT28 utilizadas en la fachada norte y poniente cambian de fase cada día generalmente, manteniendo la temperatura interna de la ventana cercana a la temperatura de cambio de fase del PCM. Durante el invierno, las tres parafinas son capaces de mantener la temperatura interior de la ventana cercana a la temperatura de cambio de fase cuando la fachada vidriada está orientada al norte, mientras que cuando la fachada vidriada está orientada al poniente, solo las parafinas RT25 y RT25HC son capaces de cambiar de fase diariamente. Finalmente, la parafina RT31 cambia de fase solo en verano para ambas orientaciones, y la parafina RT35 nunca cambia de fase.

Además, el PCM tiene efecto durante la noche en algunos casos. Durante el verano en la fachada poniente en Copiapó, y durante el verano en Santiago para ambas orientaciones de la fachada vidriada, el efecto cambio de fase es capaz de mantener la temperatura interior de la ventana constante por hasta dos días. Para asegurar el correcto desempeño de la ventana con PCM, es necesario que el cambio de fase ocurra a diario. En la mañana, el PCM debe pasar a estado líquido, y durante la tarde debe cambiar a estado sólido. Debido a esto, en verano, las parafinas RT31 y RT35 tienen la capacidad de cambiar de fase diariamente, y en invierno, las parafinas RT25 y RT25HC muestran esta capacidad. En Concepción no se alcanza a observar este efecto debido a que las temperaturas del aire exterior durante el verano son menores en comparación a Santiago y Copiapó.

En Concepción (Figura 5), las parafinas RT25 y RT25HC utilizadas en la fachada norte y poniente, cambian de fase cada día generalmente, manteniendo la temperatura interna de la ventana cercana a la temperatura de cambio de fase del PCM. Durante el verano, ambas parafinas tienen un buen desempeño, ya que durante las horas de trabajo logran mantener la temperatura interna de la ventana en el rango de confort, y además cambian de fase diariamente sin tener el efecto nocturno del PCM observado en Santiago y Copiapó. Para ambas orientaciones de la fachada vidriada, durante el invierno, el PCM es útil solo tres días de la semana representativa durante pocas horas sin apreciarse una diferencia notoria con el caso de la ventana rellena con aire.

En todos los casos, la diferencia de calor latente entre las parafinas RT25 y RT25HC no es relevante en los casos evaluados.

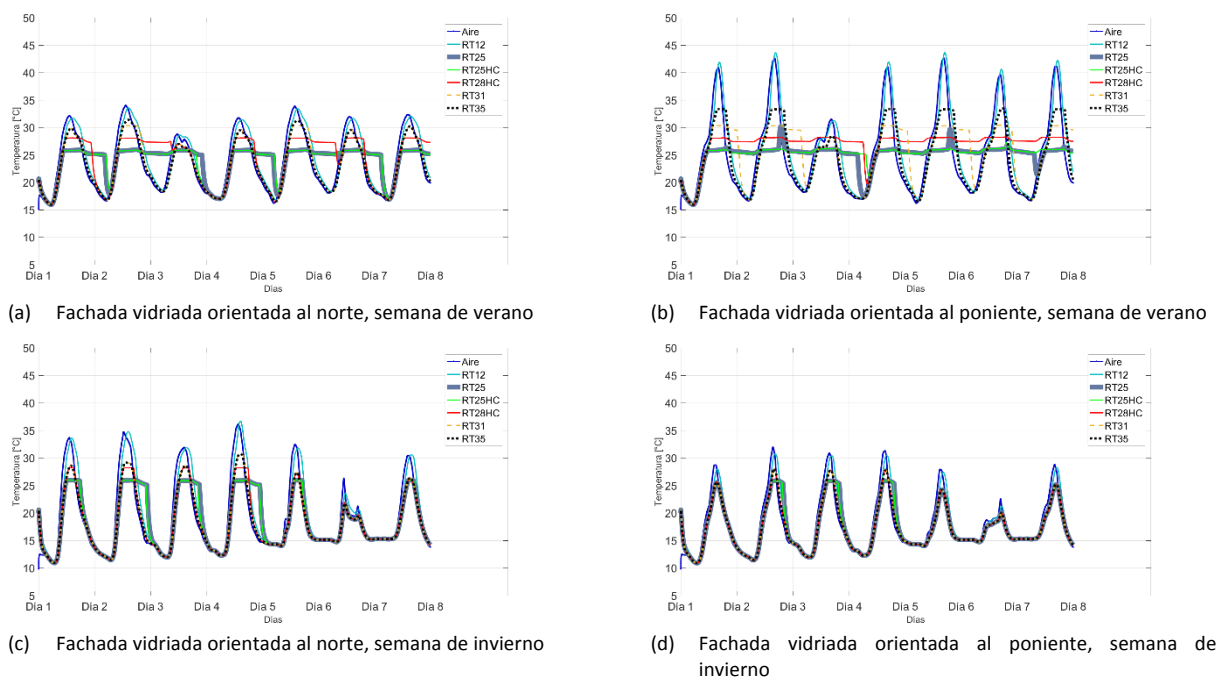
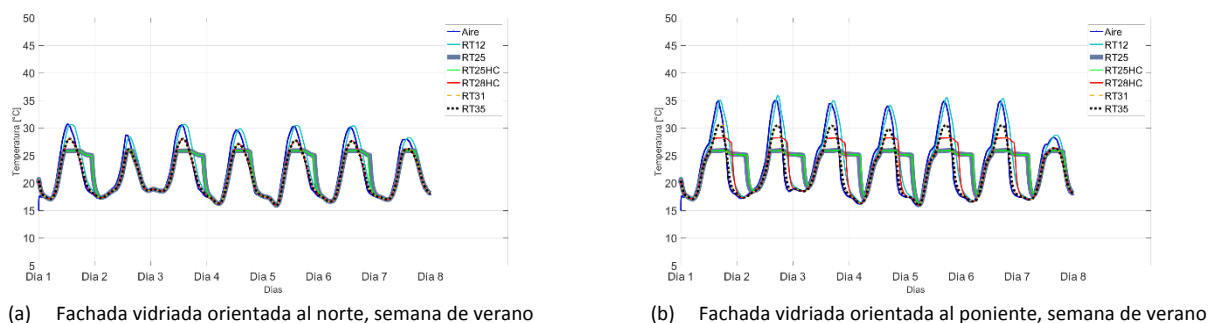
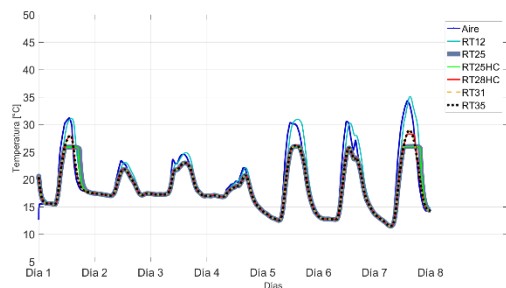
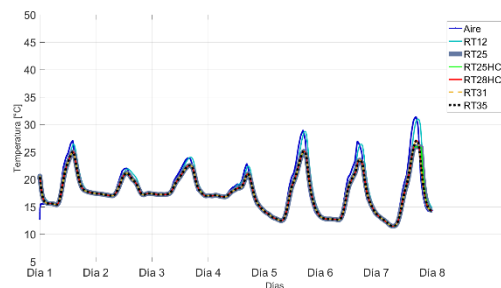


Figura 16. Temperatura interior de la ventana en Santiago para una semana representativa de verano e invierno.





(c) Fachada vidriada orientada al norte, semana de invierno



(d) Fachada vidriada orientada al poniente, semana de invierno

Figure 17. Temperatura interior de la ventana en Concepción para una semana representativa de verano e invierno.

## Discusión y Conclusiones

Este artículo muestra el desempeño térmico de una ventana con doble vidrio rellena con PCM ubicada en un módulo de oficina en tres climas asociados a las ciudades de Copiapó, Santiago y Concepción, y bajo dos orientaciones de la fachada vidriada, norte y poniente. Para llevar a cabo esto, se desarrolló un modelo numérico de transferencia de calor de ventanas con PCMs basado en la literatura.

Los PCMs RT25 y RT25HC tienen un mejor desempeño térmico respecto a las otras parafinas evaluadas porque reducen la temperatura interior de la ventana entre 0°C y 10°C, y mantienen dicha temperatura cercana al rango de confort. Debido a esto, la parafina RT25 y RT25HC permiten alcanzar niveles de confort interior aceptables al disminuir la temperatura media radiante de la oficina. Estudios futuros son necesarios para evaluar el desempeño de ventanas con doble vidrio y materiales de cambio de fase en su interior bajo otros climas, y para integrar este modelo al software EnergyPlus con la finalidad de evaluar el impacto que tienen las ventanas con materiales de cambio de fase en el consumo energético de los edificios.

## Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONICYT) bajo los proyectos de investigación ELAC2015/T06-0462 y apoyado por el proyecto CONICYT/FONDAP/15110020 (CEDEUS).

## Referencias

- Bustamante, W., Vera, S., Prieto, A., & Vásquez, C. (2014). Solar and Lighting Transmission through Complex Fenestration Systems of Office Buildings in a Warm and Dry Climate of Chile. *Sustainability*, 6(5). doi:10.3390/su6052786
- Giovannini, L., Goia, F., Verso, V. R. M. L., & Serra, V. (2017). Phase Change Materials in Glazing: Implications on Light Distribution and Visual Comfort. Preliminary Results. *Energy Procedia*, 111(Supplement C), 357-366. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.197>
- Goia, F., Perino, M., & Haase, M. (2012). A numerical model to evaluate the thermal behaviour of PCM glazing system configurations. *Energy and Buildings*, 54(Supplement C), 141-153. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.036>
- Goia, F., Zinzi, M., Carnielo, E., & Serra, V. (2015). Spectral and angular solar properties of a PCM-filled double glazing unit. *Energy and Buildings*, 87(Supplement C), 302-312. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.019>
- Ilaria, V., Lorenza, B., Goia, F., & Serra, V. (2018). Phase Change Materials in Transparent Building Envelopes: A Strengths, Weakness, Opportunities and Threats (SWOT) Analysis. *Energies*, 11(1), 1-19. doi:10.3390/en11010111
- Liu, C., Zheng, Y., Li, D., Qi, H., & Liu, X. (2016). A Model to Determine Thermal Performance of a Non-ventilated Double Glazing Unit with PCM and Experimental Validation. *Procedia Engineering*, 157(Supplement C), 293-300. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.369>
- Shipkovs, P., Lebedeva, K., Vanags, M., Snegirjovs, A., Kashkarova, G., Franco, J., . . . Knera, D. (2018). *Internal Report Workpackage 1 Project SOLTREN. PCM selections. Investigation of thermophysical properties of PCMs. Experimental study on solar transmittance using spectrophotometric techniques.*
- Silva, T., Vicente, R., & Rodrigues, F. (2016). Literature review on the use of phase change materials in glazing and shading solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 515-535. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.201>
- Tabares-Velasco, P. C., Christensen, C., & Bianchi, M. (2012). Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. *Building and Environment*, 54, 186-196. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.019>





# Análise comparativa do desempenho higrotérmico de vedações verticais em cal-cânhamo, concreto e madeira com isolamento de celulose.

Comparative analysis of the hygrothermal performance of vertical walls in hemp-lime, concrete and wood with cellulose insulation.

## Carolina Rodrigues Dal Soglio

Filiação: Universidade Federal de Santa Catarina

Endereço: Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon). Depto. de Arquitetura e Urbanismo, CTC-UFSC. Campus Trindade. CEP 88040-970. Florianópolis (SC), Brasil.

E-mail: carolina@labcon.ufsc.br

## Martin Ordenes Mizgier

Filiação: Universidade Federal de Santa Catarina

Endereço: Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon). Depto. de Arquitetura e Urbanismo, CTC-UFSC. Campus Trindade. CEP 88040-970. Florianópolis (SC), Brasil.

E-mail: martin@arq.ufsc.br

**Manuscript Code:** 026

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

## Abstract

The ability of a building to regulate the amount of moisture present in the indoor environment has been recognized as beneficial in preventing damages to human health, comfort and building materials caused by inadequate levels of indoor humidity. This study aims to compare the hygrothermal performance of different building materials (concrete, hemp-lime and a composition of wood and cellulose insulation) in the subtropical humid climate with hot summer in the city of Florianópolis (SC). The simulations were performed using the HAMT algorithm of heat and moisture transfer of the EnergyPlus software. The results indicated that the concrete and hemp-lime walls perform significant moisture changes with the external environment, unlike the walls with wood and cellulose insulation, which present less humidity exchanges with the environment.

**Keywords:** hygrothermal performance, Moisture in buildings, Indoor humidity.

## Resumo

A capacidade de uma edificação de regular a quantidade de umidade presente no ambiente interno tem sido reconhecida como benéfica ao evitar os danos à saúde, conforto e aos materiais de construção causados por níveis inadequados de umidade interna. Este estudo tem por objetivo comparar o desempenho higrotérmico de diferentes materiais construtivos (concreto, cal-cânhamo e uma composição de madeira e isolante de celulose) no clima subtropical úmido com verão quente de Florianópolis (SC). As simulações foram realizadas utilizando o algoritmo HAMT de transferência de calor e umidade do software EnergyPlus. Os resultados indicaram que as paredes de concreto e de cal-cânhamo realizam trocas de umidade expressivas com o ambiente externo, diferentemente das paredes com madeira e isolamento de celulose, que se apresentam com menores trocas de umidade.

**Palavras chaves:** Performance Higrotérmica, Umidade nas edificações, Umidade interna.

## Introdução

A umidade presente nas edificações é resultado do vapor d'água proveniente do ambiente externo e da umidade gerada dentro das próprias edificações. A umidade é transportada através dos materiais em forma líquida ou gasosa (vapor). Quando a envoltória é permeável ao vapor d'água, ocorre um gradiente de vapor através dos elementos construtivos e a pressão de vapor interna não segue as flutuações da produção de vapor interna. Envoltórias compostas por materiais porosos também possuem a capacidade de armazenar umidade (GIVONI, 1976).

A ocorrência de altas umidades relativas no interior das edificações pode ser prejudicial à saúde e o conforto térmico humano, além de ser uma das condições favoráveis a proliferação de fungos nas superfícies internas (SEDLBAUER, 2002). Os danos aos materiais envolvem mudanças nas suas dimensões, apodrecimento dos materiais orgânicos (madeira, bambu, palha), corrosão do metal, amolecimento do gesso ou do reboco, desintegração da cola de painéis laminados colados, eflorescência de sais solúveis e descascamento dos revestimentos. Em termos de conforto térmico, a umidade presente no ar determina sua capacidade evaporativa e, conseqüentemente, o potencial do resfriamento evaporativo, mecanismo termorregulador importante para o corpo humano (suor) (GIVONI, 1976). Os principais fatores que afetam a ocorrência e a intensidade da condensação em uma edificação é o nível de pressão de

vapor interna, a temperatura, a capacidade de absorção das superfícies internas e a transmissão de vapor através das paredes.

A capacidade de uma edificação de regular a quantidade de umidade presente no ambiente interno tem sido reconhecida como benéfica ao evitar os danos à saúde, conforto e aos materiais de construção causados por altos níveis de umidade interna. Este estudo tem por objetivo comparar o desempenho higrotérmico de diferentes materiais construtivos (concreto, cal-cânhamo e uma composição de madeira e isolante de celulose) em um clima subtropical úmido, na cidade de Florianópolis (SC). Três diferentes modelos foram simulados anualmente utilizando o programa EnergyPlus.

## Estado da arte do problema

O potencial de utilizar materiais de construção como agentes ativos para regulação da umidade nos ambientes internos e, conseqüentemente, promover um ambiente interno mais saudável têm sido objeto de diversos estudos. Materiais de construção porosos apresentam propriedades higrotérmicas que contribuem para a regulação de temperatura e umidade, mantendo a umidade relativa do ambiente interno estável e abaixo da umidade relativa média do ambiente externo, em níveis adequados à saúde humana e que evitam a proliferação de fungos (REMPEL; REMPEL, 2016; MCGREGOR et al, 2014; LIUZZI et al., 2012; HALL, 2008). Além da função de regulação de umidade, o resfriamento evaporativo intrínseco de materiais higroscópicos tem sido estudado (REMPEL; REMPEL, 2016) em relação a seu potencial como estratégia de condicionamento térmico passivo, apresentando bons resultados mesmo em climas subtropicais úmidos.

Nas análises de desempenho térmico de edificações, em geral, a transferência de umidade nas paredes é negligenciada, desconsiderando a influência das trocas de calor latente, ainda que a maioria dos materiais de construção sejam porosos e contenham água em diferentes fases. MENDES et al. (2014) evidenciam a importância de se incluir a combinação de transferência de massa e calor na simulação da performance energética de edifícios, para a obtenção de resultados mais precisos, principalmente em climas quentes e úmidos. MENDES, LAMBERTS e PHILIPPI (2018) constataram através de simulações com o programa UMIDUS que a existência de camadas de impermeabilização (tintas e demais barreiras de vapor) interferem nas trocas de calor latente e sensível nas edificações. BARCLAY, HOLCROFT e SHEA (2014) simularam o desempenho higrotérmico de uma edificação em Cal-Cânhamo (Hemp-Lime) utilizando os programas WUFI Pro e EnergyPlus (modelo HAMT) e obtiveram uma significativa diferença de 18% entre os resultados. Ambas simulações evidenciaram que, quando se aplica o modelo de transferência de calor e massa, a umidade relativa é a variável mais sensível e há pouca influência nos resultados de carga térmica.

## Metodologia

### Modelagem

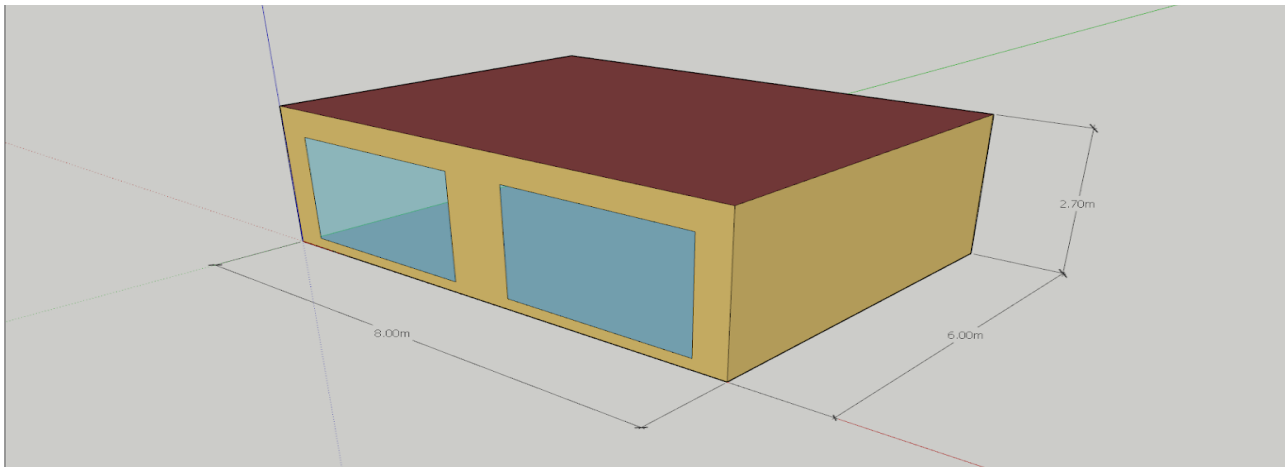
A modelagem foi realizada através do programa EnergyPlus (versão 8.9), utilizando o algoritmo de transferência combinada de calor e massa (Combined Heat and Moisture Transfer – HAMT). O arquivo de exemplo *HAMT\_HourlyProfileReport.idf* foi utilizado como referência. Este modelo consiste em uma única zona, de dimensões 8x6x2,7 m e com duas janelas de 2x3 m localizadas na superfície “parede sul” (ver Figura 1). Para não haver a interferência de equipamentos de ar condicionado na umidificação e desumidificação das zonas, qualquer forma de condicionamento de ar foi retirada do modelo, mantendo então as temperaturas internas dependendo apenas das trocas de calor e massa através das superfícies. A quantidade de trocas de ar por hora foi reduzida de 0,5 para 0,01, para diminuir a quantidade de interferência do ar externo sobre o desempenho de trocas de umidade nas paredes. Não houve o acréscimo de nenhuma fonte de umidade ou calor interno.

Conforme disposto na Tabela 1, as propriedades higrotérmicas dos materiais concreto, madeira e isolamento de celulose constam na base de dados do programa EnergyPlus (Example files) e as propriedades higrotérmicas do material cal-cânhamo foram obtidas através do estudo de Barclay, Holcroft E Shea (2014). Este estudo não considerou revestimentos, como rebocos ou tintas.

Tabela 12. Propriedades higrotérmicas dos materiais simulados. Fonte: Autores.

| Superfícies                             | Composição             | espessura | fonte                            |
|---|------------------------|-----------|----------------------------------|
| Parede Concreto                         | concreto               | 10 cm     | ExampleFiles                     |
| Parede Cal-Cânhamo                      | cal-cânhamo            | 10 cm     | Barclay, Holcroft E Shea (2014). |
| Parede Madeira + Isolamento de Celulose | madeira                | 1.2 cm    | ExampleFiles                     |
|   | isolamento de celulose | 6 cm      | ExampleFiles                     |
|   | madeira                | 1.2 cm    | ExampleFiles                     |

Figura 18. Modelo representado tridimensionalmente no SketchUp, através do Plugin Euclid. Fonte: Autores

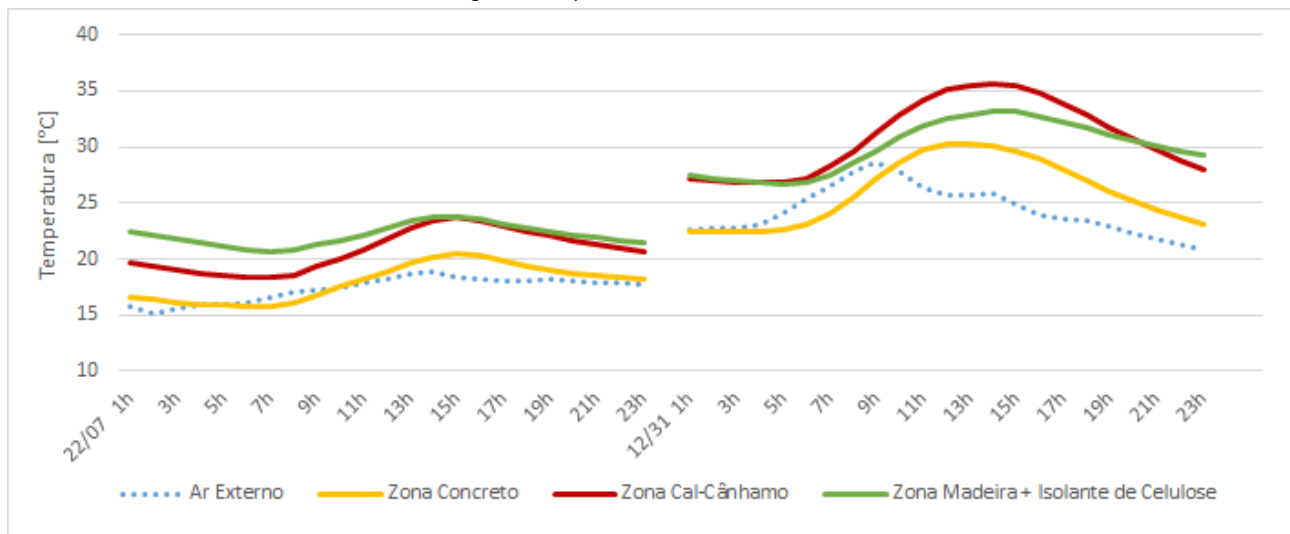


O Arquivo climático utilizado para as simulações foi do INMET 2016 (LABEEE, 2016) para a cidade de Florianópolis (SC), caracterizado como clima subtropical úmido com verão quente. Após simular o modelo anualmente foram selecionados um dia de inverno (21/07) e um dia de verão (31/12) para análise dos resultados, apresentados a seguir.

## Resultados

### Temperatura do ar

Figura 2. Temperatura do ar. Fonte: Autores.

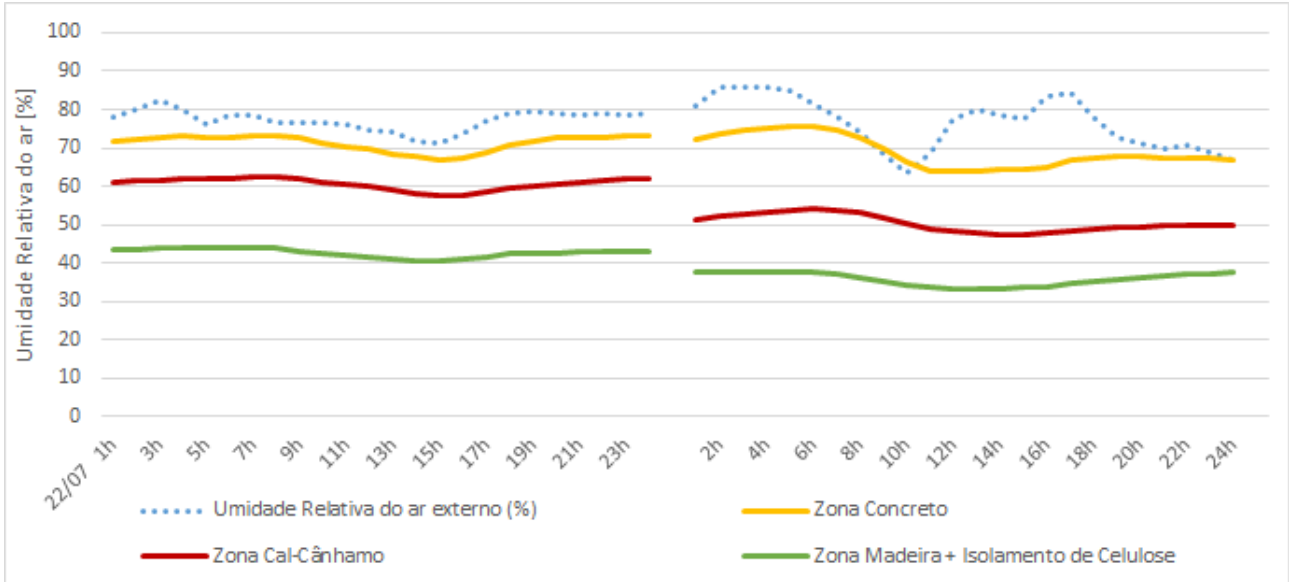


Como se pode observar na Figura 2 a zona Concreto apresenta temperaturas mais próximas das temperaturas externas em ambos os dias analisados. Este comportamento indica que o material apresenta altas taxas de trocas térmicas com o ambiente externo, não sendo um bom isolante térmico. As zonas Cal-Cânhamo e Madeira+Isolamento de Celulose apresentaram um comportamento distinto, pois não perderam o calor facilmente para o ambiente externo, mantendo as temperaturas sempre mais elevadas. Percebe-se maior amplitude térmica na zona Cal-Cânhamo que na zona Madeira+Isolamento de Celulose.

### Umidade relativa do ar

Realizar comparações em termos de umidade relativa pode gerar equívocos, pois conforme visto na Figura 2 as temperaturas são distintas entre cada zona e entre o ambiente externo, influenciando na quantidade de umidade que o ar pode conter.

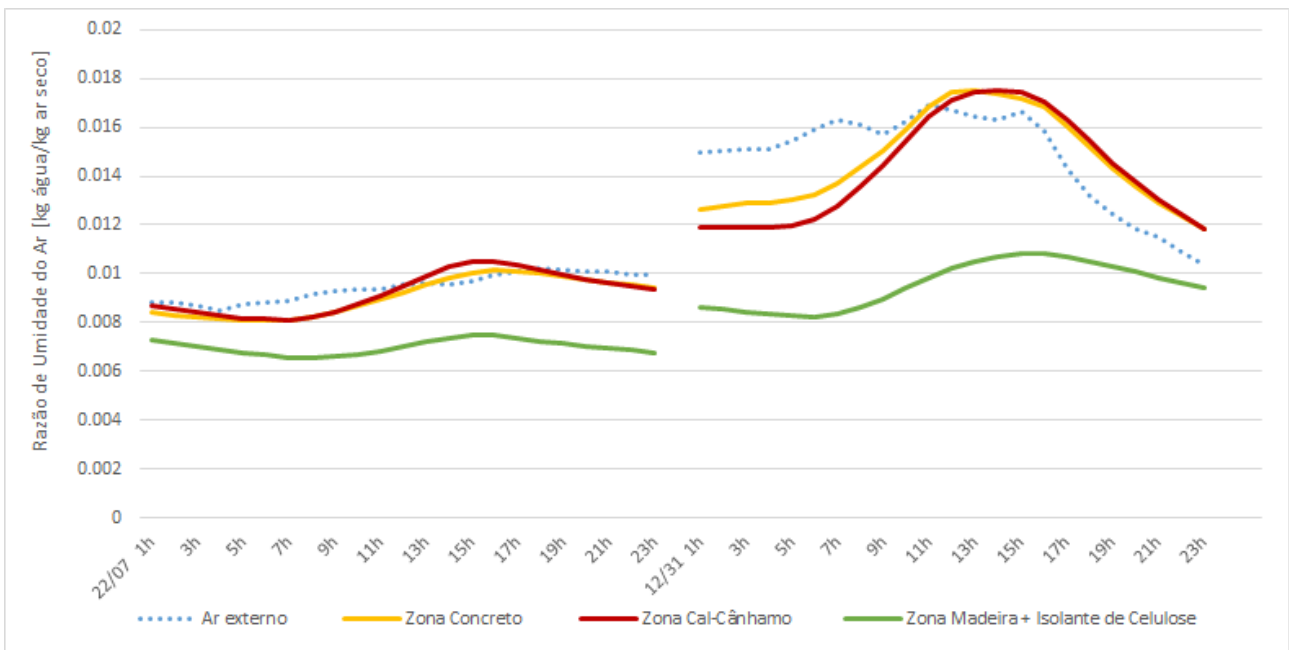
Figura 3. Umidade relativa do ar. Fonte: Autores.



É possível observar que as temperaturas internas da Zona Madeira+Isolamento de Celulose e da Zona Cal-Cânhamo são semelhantes e, no entanto, apresentam uma diferença de aproximadamente 15% de umidade relativa no dia 22/07 e de 10% no dia 31/12, conforme se percebe na Figura 3. A umidade relativa da Zona Concreto é a mais alta, porém também suas temperaturas internas são menores. Para comparar a quantidade absoluta de água é necessário verificar a razão da umidade do ar (Figura 4).

### Razão de umidade do ar

Figura 4. Razão de umidade do ar. Fonte: Autores.

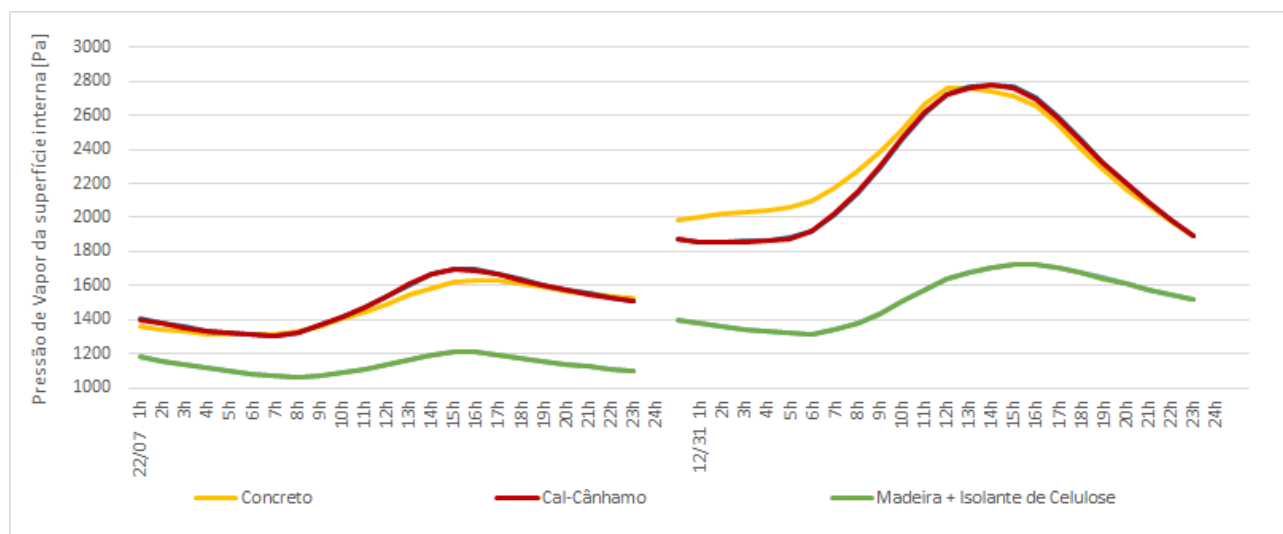


Ao analisar a Figura 4, percebe-se que as zonas Concreto e Cal-Cânhamo apresentam valores próximos à curva de razão de umidade do ar externo, diferindo do comportamento da zona com paredes em madeira e isolamento de celulose. O gráfico indica que o ar interno da zona Madeira+Isolamento de Celulose possui menor quantidade de vapor d'água do que as demais zonas e o ambiente externo, mesmo apresentando temperaturas internas semelhantes à zona Cal-Cânhamo, o que indica uma menor troca de umidade através da envoltória. Logo, os materiais concreto e cal-cânhamo apresentam uma maior troca de umidade com o meio externo do que a madeira com isolamento de celulose.

### Pressão de vapor da superfície interna

A pressão de vapor nas diferentes superfícies de cada zona (paredes, piso e teto) apresentaram valores com diferenças insignificantes, portanto apenas os dados obtidos para a parede leste foram comparados.

Figura 5. Pressão de vapor nas superfícies internas (paredes lestes). Fonte: Autores.

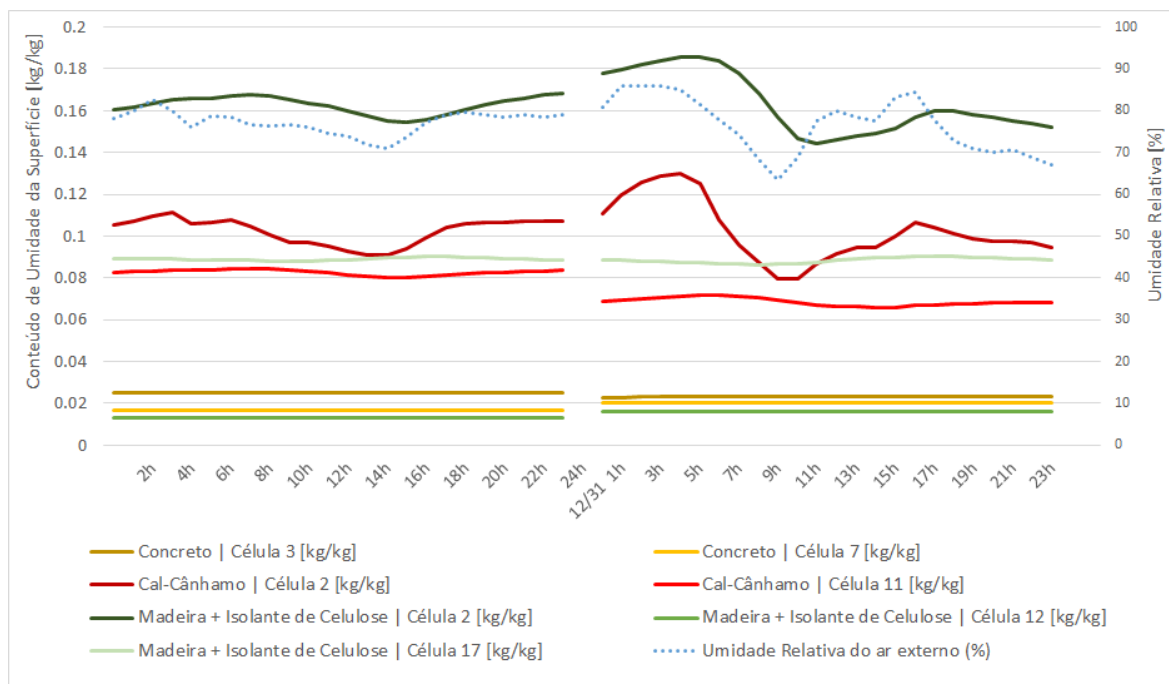


Conforme podemos ver na Figura 5 a zona Madeira+Isolamento de Celulose obteve os menores valores de pressão de vapor nas superfícies internas, o que condiz com sua condição de possuir a menor razão de umidade do ar. Esta zona também apresentou a menor variação em sua pressão de vapor, comparando com as zonas Concreto e Cal-Cânhamo. As curvas de pressão de vapor seguem as tendências vistas no gráfico de temperaturas (Figura 2) e de razão da umidade do ar (Figura 4).

### Conteúdo de umidade das superfícies

Para analisar o conteúdo de umidade as superfícies foram divididas em células, com a numeração partindo do meio externo para o interno.

Figura 6. Conteúdo de umidade das superfícies. Fonte: Autores.



As células das paredes de concreto apresentaram baixo conteúdo de água e pouca variação entre sua superfície interna e externa, indicando que não armazenam uma quantidade significativa de umidade dentro do material construtivo. O cal-cânhamo é um material cuja superfície externa variou na mesma proporção que a umidade relativa externa, variando entre 0.08 e 0.12  $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{material}}$ . e sua superfície interna apresentou uma variação menor, mas ainda com um conteúdo de água semelhante ao da superfície externa.

As paredes compostas de madeira e isolamento térmico possuem um comportamento heterogêneo ao longo de suas camadas, sendo que a superfície externa (composta de madeira) possui o maior conteúdo de umidade, variando entre 0.16 e 0.19  $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{material}}$ , e é responsiva às variações de umidade externa. A superfície interna, também composta de madeira, apresenta um conteúdo de umidade similar ao apresentado pela parede de cal-cânhamo, porém a camada intermediária, composta de isolamento de celulose, apresenta baixo conteúdo de umidade indicando que não há acúmulo de umidade na parte interna da parede.

## Discussão e Conclusões

A zona Madeira+Isolamento de Celulose apresentou temperaturas internas mais altas que o ambiente externo, indicando um comportamento térmico isolante e apresentou poucas trocas de umidade com o ambiente externo, indicada pela menor pressão de vapor nas superfícies internas e pela menor razão de umidade do ar. O menor conteúdo de umidade em sua camada intermediária (isolamento de celulose) indicou baixa capacidade de armazenar umidade.

A zona Concreto apresentou os valores de temperatura e razão de umidade do ar mais próximos do ambiente externo, indicando troca de calor e umidade, e não apresentou o potencial de acumular umidade em suas superfícies, visto pelo baixo conteúdo de água em suas superfícies.

A zona com envoltória de cal-cânhamo apresentou resultados próximos ao concreto em termos de razão de umidade do ar e pressão de vapor, porém se aproximou do isolante de celulose em termos de temperaturas internas. Estes resultados indicam maiores trocas de umidade com o ambiente externo e menor troca de calor, além de demonstrar a capacidade do material em armazenar umidade.

Neste contexto climático, de alta umidade relativa do ar, a capacidade de armazenar umidade das paredes de cal-cânhamo não demonstrou uma influência significativa na razão de umidade do ar interno da zona, pois os resultados foram muito semelhantes à zona Concreto. O comportamento higrotérmico do cal-cânhamo, neste contexto climático, é de interesse pois apresentou maior isolamento térmico mantendo as trocas de umidade do ar interno com o ar externo.

Estudos considerando a influência das trocas de ar com o exterior (ventilação e infiltração) e a produção interna de vapor são necessários para verificar com maior precisão como estes materiais se comportam em relação às trocas de calor e umidade em climas quentes e úmidos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro.

## Referências

- Barclay; Holcroft; Shea (2014). Methods to determine whole building hygrothermal performance of hemp-lime buildings. *Buildings and environment* v. 80, p. 204-2012.
- Givoni, B. (1976). *Man, Climate and Architecture*. Applied Science Publishers. Segunda edição. 483 p.
- Hall, A. (2008). Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilized rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering*, v. 29. P 740 – 747.
- McGregor et al (2014). The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. *Building and Environment* v. 82. P.599-607.
- Minke, G. (2006). *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. 208 p.
- Mendes, N.; Winkelmann, F; Lamberts, R.; Philippi, P.; Cunha Neto, J. A. (2018). Dynamic Analysis of Moisture Transport through Walls and Associated Cooling Loads in the Hot/Humid Climate of Florianópolis, Brazil. *Researchgate*.
- Mendes; Lamberts; Philippi. Moisture Migration through Exterior Envelopes in Brazil. *Buildings VIII. Applied Heat and Moisture Modeling – principles*. Available in: [https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/2001%20B8%20papers/026\\_Mendes.pdf](https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/2001%20B8%20papers/026_Mendes.pdf).
- Rempel;Rempel (2016). Intrinsic evaporative cooling by hygroscopic earth materials. *Geosciences*, v. 06 p. 38. ‘
- Liuzzi et al. (2013). Hygrothermal behavior and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a mediterranean climate. *Building and Environment* 61. P. 82-92.
- LABEEE (2016). Arquivos Climáticos INMET

## Calibração e convergência do Método Transiente de Seções Finitas para Transwalls delgadas de diferentes espessuras.

Transient Heat Balance Model time-step calibration and convergence for different widths of thin transwalls.

### Yuri Piffer

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.  
Dpto. Arquitetura e Urbanismo - UFSC  
Trindade  
88040900 - Florianópolis, SC - Brasil  
Correo: yuripiffer@hotmail.com

### Saulo Güths

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.  
Dpto Eng. Mecânica - UFSC  
Trindade  
88040900 - Florianópolis, SC - Brasil  
saulo@lmpt.ufsc.br

### Martin Ordenes Mizgier

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.  
Dpto Arquitetura e Urbanismo - UFSC  
Trindade  
88040900 - Florianópolis, SC - Brasil  
martin@arq.ufsc.br

**Manuscript Code:** 027

**Date of Acceptance/Reception** 06.07.2018/31.05.2018

### Resumo

O presente trabalho analisa por ferramentas de programação o intervalos de tempo ( $\Delta t$ ) adequado à simulação de transwalls delgadas pelo Método Transiente de Seções Finitas (MTSF) e também avalia o número de repetições de um dia hipotético necessários para que a simulação encontre-se calibrada. A partir de dos dados de um dia climático hipotético, analisou-se o comportamento de quatro perfis de transwalls: 2mm, 10mm, 50mm e 100mm de lâmina de água entre vidros simples de 3mm. Variou-se o modelo de absorção da radiação entre duas opções, o intervalo de tempo de iteração e a temperatura inicial das seções adotadas. Os resultados apontaram que quanto maior a espessura da lâmina de água, menor é o ganho de calor no ambiente interno; que a calibração ocorre no terceiro dia de simulação para a amostra com seção de 100mm de lâmina de água e no segundo dia para as outras espessuras e que o intervalo de 0,5segundos é suficiente para a convergência do MTSF.

**Palabras claves:** Método Transiente de Seções Finitas, transwall, balanço de energia em fachadas, transferência de calor em vidros.

### Abstract

The present work analyzes suitable time-step intervals ( $\Delta t$ ) and the number of hypothetical-day repetitions required for temperature calibration of thin transwalls using Transient Heat Balance Model (THBM) programing simulation. Considering a hypothetical climate condition day, the behavior of four transwall's profiles: 2mm, 10mm, 50mm and 100mm of water section inside two single 3mm clear float glass have been analyzed. Two different types of solar radiation absorbance models, time-steps for iteration and initial temperatures where tested. The results showed that increasing water's thickness reduces internal heat gain. Also, calibrated conditions have been achieved on the third day of simulation for the sample with 100mm water width and on the second day for all other thicknesses. Last but not least, the time-step interval of 0.5 seconds has proofed to be adequate for the THBM convergence.

**Keywords:** Transient Heat Balance Model, transwall, façade's energy balance, glazing heat transfer.



## Introdução

A simulação computacional desempenha papel crucial na análise do comportamento de transferência de calor dos elementos envoltórios da construção civil. Softwares de análise integrada, como o EnergyPlus, permitem que a partir da modelagem de um ambiente construído com dados da geometria, arquivos climáticos e características de uso da edificação, simule-se o desempenho energético do ambiente por meio de inúmeros balanços energéticos simultaneamente. Entre os vários balanços realizados por estes softwares está o cálculo de transferência de calor. Devido à inexistência de um método analítico preciso e global para a análise da transferência de calor, emprega-se o Método Transiente de Seções Finitas (MTSF) para tais finalidades.

Define-se o MTSF como uma ferramenta de cálculo numérico que discretiza um material em questão em várias outras partes menores (seções) analisando-as por um dado período de tempo afim de caracterizar o fenômeno de transferência e armazenamento de calor em cada uma dessas partes. Suscintamente, este recurso matemático permite conhecer a temperatura de um dado ponto uma vez sabidas as temperaturas de pontos adjacentes num intervalo de tempo anterior e as condições de contorno. Consequentemente, este processo de simulação é condicionado pela espessura das seções ( $\Delta x$ ), pelo intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) adotado e pelas condições de convergência numérica para que os resultados da simulação sejam confiáveis. O comportamento térmico de transwalls delgadas, que são vedações ou janelas transparentes com visual parecido à um pano de vidro, espectroseletivas e que utilizam delgadas lâminas de água ou soluções em suas cavidades (como um vidro sanduíche de “vidro-líquido-vidro”) pode também ser calculado pelo MTSF.

Por outro lado, o fenômeno de transferência de calor em uma transwall, além de envolver os três processos de trocas de calor de sistemas sólidos (condução entre os sólidos, convecção com as faces em contato com o ar e radiação entre as superfícies), engloba também o comportamento convectivo da água e a geração de energia no sistema por meio da absorção da radiação solar. A convecção da água, por sinal, deve ser calculada conforme as propriedades do líquido que variam de acordo com a temperatura da seção e das características da cavidade onde a água se encontra. Muito embora os softwares de simulação integrada sofram atualizações constantemente, estes ainda não permitem a modelagem de transwalls devido à complexidade entre o processo de absorção de radiação e transmissão de calor em fluidos com algoritmos diferentes do empregado para gases.

Uma alternativa para este tipo de cálculo são os CFD (Computational Fluid Dynamics) que, no entanto, também têm suas limitações. Uma delas é o fato de que as transwalls precisam ser calibradas- isto é, que a temperatura das seções no instante inicial sejam iguais sempre que simuladas sob um estímulo periódico de calor. Considerando-se que na primeira simulação de um dado modelo a temperatura das primeiras seções são estimadas pelo autor, é necessário que esse estímulo periódico de calor se repita (no caso deste artigo, a repetição se refere a um dia hipotético) até que a diferença de temperatura das primeiras seções entre dois dias consecutivos seja nula.

As ferramentas de CFD, então, por exigirem dos computadores processamento pesado de dados, sob cenários de vários dias de simulação, acarretam demasiadas horas de rodagem, tornando-se uma opção mais demorada para a análise de transwalls.

O modelo do MTSF pode ser avaliado por outras ferramentas que permitam iteração numérica, como planilhas e softwares de programação. No caso específico das transwalls delgadas, o pequeno espaçamento das cavidades exige que as distâncias entre os nós adotados nas seções do modelo ( $\Delta x$ ) também tenham valores baixos. Por conseguinte, faz-se necessário que o intervalo de tempo entre as iterações ( $\Delta t$ ) também seja reduzido a fim de atender as condições de convergência estabelecidas pelo número de Fourier ( $Fo$ ). Valores baixos de  $\Delta x$  e  $\Delta t$  acarretam significativo aumento do número de iterações e tornam-se impraticáveis em planilhas eletrônicas (p.ex. Excel) as quais devem ser substituídas por softwares de programação. Todavia, mesmo simulações do MTSF em softwares de programação podem ser demoradas devido às interpolações das propriedades dos materiais, cálculo da convecção do fluido e iterações de transferência e calor. Justifica-se, portanto, a análise de um intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) conveniente que seja suficientemente pequeno para que haja convergência no MTSF em transwalls delgadas e que não seja demasiadamente pequeno afim de evitar o excesso do número de linhas referentes à somatória de iterações. É preciso também conhecer o número de dias de calibração necessários para transwalls delgadas com cavidades de diferentes espessuras para otimização do método.

## Estado da arte

O processo de transferência de calor é, sem dúvidas, o assunto mais pesquisado e simulado por parte dos trabalhos já realizados de transwalls. A primeira modelagem de transwall realizada por Fuchs e McClelland (1979) considerou o uso de géis espessantes na água e o uso de baffles (compartimento transparente para reduzir a convecção). Os autores analisaram a transwall sem convecção tratando-a como o comportamento de um sólido. Para comparação, também foi feita uma ponderação da condução deste “sólido equivalente” aumentando seus valores de condução para estimar o comportamento de um fluido.

Shoda, Bansal e Ram (1983), Nayak (1987a, 1987b), Nisbet e Kwan (1987), Upadhya, Tiwari e Rai(1991) e Twari, Upadhya e Rai (1991) não utilizaram géis espessantes ou baffles e calcularam o processo convectivo do fluido na transferência de calor adotando um coeficiente de convecção (h) fixo.

Nisbet e Mthembu (1992) realizaram o primeiro trabalho onde o coeficiente de convecção da água na cavidade foi calculado pelo número de Nusselt do fluido e não um valor preestipulado. Xiangfeng e Tiangxing (2011) também utilizaram o número de Nusselt para o cálculo da convecção da água, no entanto modelaram a transferência de calor da transwall por resistência equivalente e não por MTSF.

Wu e Lei construíram um protótipo e também simularam um sistema espesso de transwall na cidade de Sydney, Austrália para o qual foi necessário 7 dias de calibração da simulação (WU, LEI, 2016a). Ainda sobre o processo de modelagem de convecção, os mesmos autores simularam por CFD o comportamento do ar em cavidades com superfícies em temperaturas diferentes (WU, LEI, 2015a, 2015b) e o desempenho de uma transwall com faces opacas que são chamadas de waterwall (WU, LEI, 2016b). Wu e Lei admitem que há trocas radiantes entre as faces internas da transwall uma vez que este fenômeno foi observado nas modelagens de CFD em cavidades com ar anteriormente descritas. Todavia, os autores deste artigo admitem que a água, sendo opaca aos raios no comprimento infravermelho longo, não deverá permitir a troca radiante entre as faces do vidro e tal comportamento foi desconsiderado na aplicação do método descrito abaixo.

Todos os trabalhos anteriormente citados que calcularam a convecção líquida consideraram as propriedades termofísicas da água como constantes. É importante salientar também que estes estudos utilizaram-se de valores aproximados de absorção radiante o que pode acarretar valores imprecisos de fluxo térmico ainda que o modelo de transferência de calor esteja calibrado.

## Materiais e Método

### Características ambientais

Este estudo considera que os modelos de transwall avaliados são vedações de uma sala mantida à 23°C (temperatura do ar e das superfícies vizinhas) hipoteticamente orientadas para o Equador recebendo sol o dia inteiro. Foi adotado o mesmo cenário ambiental para todos os modelos simulados em que o sol nasce às 06hs e se põe às 18hs. O pico térmico externo acontece às 15hs com 35°C e a baixa térmica às 06hs com 26°C (ver gráfico 1).

A constante solar é de 1000W/m<sup>2</sup> e o ângulo solar é dado pelo cosseno inverso do produto do cosseno das duas parábolas: a parábola do ângulo no plano horizontal entre a posição do sol e a normal da transwall (relação azimutal) para a qual adotou-se 65° às 06hs, 0° ao meio-dia e 65° às 18hs e a parábola da altura solar tendo valores de 0° às 06hs, 80° ao meio-dia e 0° às 18hs (ver gráfico 2). A temperatura das superfícies externas vizinhas é dada pela mesma temperatura do ar externo para 50% de área do ângulo sólido em relação à exposição externa da transwall (referente ao entorno urbano) e 0°C como temperatura do céu para os outros 50% de área do ângulo sólido da abertura voltados ao céu. O índice de convecção do ar (h) tanto interno quanto externo foi mantido em 8. Admite-se que as aberturas são suficientemente grandes e desconsidera-se os efeitos de perda de calor pelas bordas da transwall.

Gráfico 1: Variação da temperatura externa ao longo do dia. Os autores, 2018.

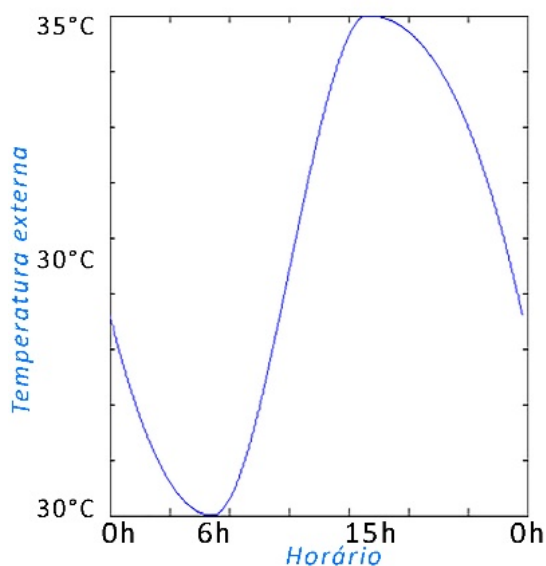
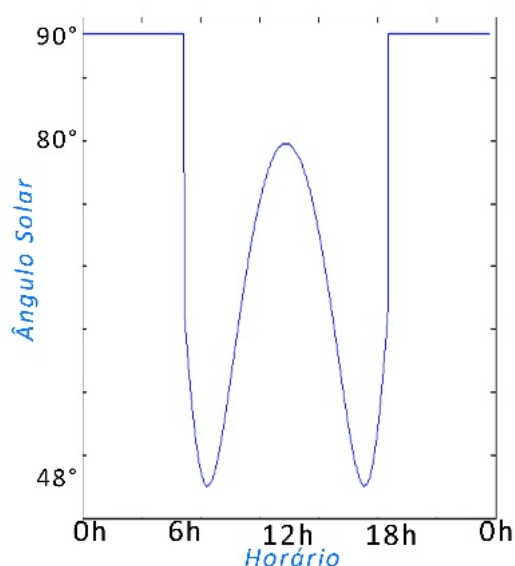


Gráfico 2: Variação do ângulo solar ao longo do dia. Os autores, 2018.



### Equações do MTSF

São dadas 7 seções, cada uma delas com fenômenos de transferência de calor característicos, de forma a representar o comportamento das transwalls. Os cálculos aplicados às seções 2, 4 e 6 referentes às partes de meio de cada material, devem ser repetidos quantas vezes necessário de forma que a soma de intervalos de seções ( $\Delta x$ ) resulte na espessura final do material a ser simulado. As seções 1, 3, 5 e 7 caracterizam as faces de materiais em contato com a matéria adjacente e é onde as trocas superficiais são calculadas. (ver figura 1 e tabela 1).

Figura 1. Ilustração das seções adotadas do Método Transiente de Seções Finitas. Os autores, 2018.

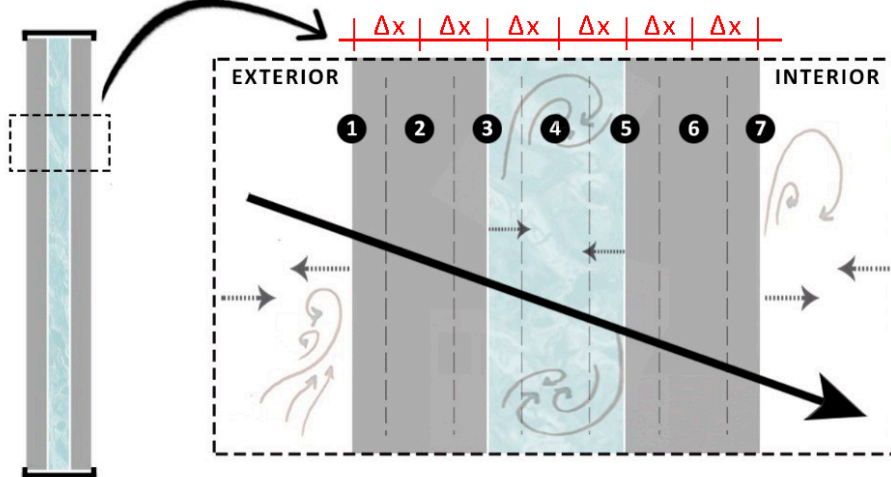


Tabela 1. Equações adotadas para cada seção do Método Transiente de Seções Finitas. Os autores, 2018.

|                   |   |     |
|-------------------|---|-----|
| $T_1$             | $T_1^{t=i+1} = 2F_{ov} \left\{ Bi_{ext}(T_{ar_{ext}} - T_1) + \frac{\Delta x}{k_v} [0,5 \sigma \epsilon ((T_{c\underline{e}u}^4 - T_1^4)(T_{viz_{ext}}^4 - T_1^4)) + A] - (T_1 - T_2) \right\} + T_1$ | (1) |
| $T_2$             | $T_2^{t=i+1} = F_{ov} \left[ T_1 + T_2 \left( -2 + \frac{1}{F_{ov}} \right) + T_3 + \frac{\Delta x}{k_v} A \right]$   | (2) |
| $T_3$             | $T_3^{t=i+1} = 2F_{ov} \left\{ (T_2 - T_3) - Bi_L(T_3 - T_4) + \frac{\Delta x}{k_v} A \right\} + T_3$   | (3) |
| $T_4$             | $T_4^{t=i+1} = F_{oL} \left[ T_3 + T_4 \left( -2 + \frac{1}{F_{oL}} \right) + T_5 + \frac{\Delta x}{k_L} A \right]$   | (4) |
| $T_5$             | $T_5^{t=i+1} = 2F_{ov} \left\{ Bi_L(T_4 - T_5) + \frac{\Delta x}{k_v} A - (T_5 - T_6) \right\} + T_5$   | (5) |
| $T_6$             | $T_6^{t=i+1} = F_{ov} \left[ T_5 + T_6 \left( -2 + \frac{1}{F_{ov}} \right) + T_7 + \frac{\Delta x}{k_v} A \right]$   | (6) |
| $T_7$             | $T_7^{t=i+1} = 2F_{ov} \left\{ (T_6 - T_7) - Bi_{int}(T_7 - T_{ar_{int}}) + \frac{\Delta x}{k_v} (-\sigma \epsilon (T_7^4 - T_{int}^4)) A \right\} + T_7$   | (7) |
| $F_{oO}$          | Número de Fourier de um dado material;  |     |
| $Bi_O$            | Número de Biot de um dado material;   |     |
| $\Delta x$        | Distância entre os nós analisados (m);  |     |
| $\Delta t$        | Intervalo de tempo adotado (s);   |     |
| $T_O^{t=i+1}$     | Temperatura do instante posterior (K);  |     |
| $T_O$             | Temperatura do instante anterior (K);   |     |
| $k_O$             | Condutividade ou condutividade equivalente (para os líquidos) do material;  |     |
| $\sigma \epsilon$ | Constante de Boltzmann multiplicada pela emissividade do material;  |     |

As propriedades do vidro foram mantidas constantes enquanto as propriedades da água foram interpoladas conforme as temperaturas da seção no dado instante. Tanto os dados do vidro como os da água se referenciam em Incropera e Dewitt (1996). O número de Nusselt ( $Nu$ ) utilizado na modelagem é descrito abaixo, de acordo com Çengel (2007), calculado a partir do número de Rayleigh ( $Ra$ ), número de Prandtl ( $Pr$ ) e da relação de altura pela largura da cavidade ( $H/L$ ):

$$Nu = 0,42Ra^{0,25} Pr^{0,012} H/L^{-0,3} \quad (8)$$

Os dados da absorção de radiação solar por seção da transwall já haviam sido anteriormente calculados pelos autores e foram adotadas duas formas de cálculo para este trabalho:

- *Seção*, que considera o valor exato de radiação solar absorvida por cada seção empregada no MTSF de acordo com a espessura da lâmina de água e de vidro a partir do ângulo solar e
- *Média*, empregando-se que a água, a qual tem alta difusividade térmica, deve manter sua temperatura homogênea em toda a lâmina de água e supostamente uma modelagem mais precisa considerará uma absorção média da radiação solar em todo o fluido ponderando-se apenas o ângulo de incidência da radiação.

### Amostras analisadas

Para manter o número de Fourier dentro das condições indicadas para convergência, adotou-se no MTSF o espaçamento entre seções ( $\Delta x$ ) de 1mm e o intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) de meio segundo (0,5s) totalizando 172800 linhas de iterações por dia para cada amostra. Foi testado também um modelo com intervalo de tempo de um quarto de segundo (0,25s) totalizando 345600 linhas para certificação da convergência do modelo anteriormente descrito com 0,5s de intervalo.

Todas as amostras têm vidro frontal e traseiro de 3mm e foram simuladas amostras com cavidade de 2mm, 10mm 50mm e 100mm de água. Cada uma testada para absorção por 'seção' e 'média'.

A temperatura inicial adotada para as seções foi próxima à 23°C, exceto um das amostras de 10mm de cavidade foi testada com temperatura inicial próxima à 7°C de forma a verificar se a mudança da temperatura inicial causaria alguma anomalia dos resultados finais do balanço de energia estando o modelo já calibrado.

A relação entre a altura e largura (H/L) da câmara do fluido na transwall foi mantida no valor de 40 para as quatro lâminas de água simuladas.

Todas as simulações foram rodadas até que a perda e ganho de calor pela transwall do dia posterior fosse igual ao do dia anterior, indicando calibração.

Tabela 2. Lista de amostras simuladas. Os autores, 2018

| Amostra | Espessura da Lâmina de água | Temperatura inicial das seções empregada | Modelo de absorção de radiação solar | $\Delta t$ |
|---------|-----------------------------|--|--------------------------------------|------------|
| A1      | 2 mm                        | ~23°C                                    | Por seção                            | 0,5s       |
| A2      | 10 mm                       | ~23°C                                    | Por seção                            | 0,5s       |
| A3      | 50 mm                       | ~23°C                                    | Por seção                            | 0,5s       |
| A4      | 100 mm                      | ~23°C                                    | Por seção                            | 0,5s       |
| B1      | 2 mm                        | ~23°C                                    | Média                                | 0,5s       |
| B2      | 10 mm                       | ~23°C                                    | Média                                | 0,5s       |
| B3      | 50 mm                       | ~23°C                                    | Média                                | 0,5s       |
| B4      | 100 mm                      | ~23°C                                    | Média                                | 0,5s       |
| C       | 10 mm                       | ~7°C                                     | Por seção                            | 0,5s       |
| D       | 10 mm                       | ~23°C                                    | Por seção                            | 0,25s      |

## Resultados

Os resultados simulados e apresentados nas tabelas 3, 4 e 5 mostram coerência do comportamento físico das transwalls. Quanto maior a espessura da lâmina de água, menor é o ganho de calor para o ambiente interno. Os valores baixos de perda de calor observados para o ambiente externo já eram esperados uma vez que a temperatura externa manteve-se em 100% do tempo acima da temperatura interna e a taxa de radiação incidente ao longo de todo o dia era alta.

A diferença de ganho de calor entre os modelos com absorção por 'seção' e 'média' é vista entre os dados apresentados nas tabelas A e tabela B e provam que há diferença do balanço de energia de acordo com a modelo de absorção adotada. Outras análises podem ser feitas em relação ao comportamento térmico das transwalls, mas ultrapassam o escopo deste artigo que é a calibração e a adoção de um intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) coerente.

Os dados de calibração mostram que todas as amostras de 2mm, 10mm e 50mm, independente do modelo de absorção solar e da temperatura inicial, já estavam calibradas no segundo dia de simulação uma vez que apresentam os mesmos resultados no dia seguinte (terceiro dia). Apenas as amostras com 100mm de lâmina de água

necessitaram um terceiro dia de simulação para calibrar-se, todavia a diferença de resultado entre o segundo e terceiro dia para estes casos foi ínfima.

A comparação entre os modelos A2 e C comprovam que mesmo utilizando-se de temperaturas iniciais das seções bastante diferentes, o MTSF, em condição de calibração, resulta nos mesmos resultados.

Os resultados A2 e D que comparam duas lâminas de 10mm de água nas mesmas condições, mas usando  $\Delta t$  diferentes certificam que o intervalo de meio segundo para seções de 1mm em modelos de transwall são suficientes.

Tabela 3. Tabela A: simulações com o modelo de absorção da radiação solar por SEÇÃO, temperatura inicial das seções próximas à 23° e  $\Delta t$  de 0,5s. Os autores, 2018

|        | 2mm água (A1)        |        | 10mm água (A2)       |           | 50mm água (A3)       |       | 100mm água (A4)      |           |
|--------|----------------------|--------|----------------------|-----------|----------------------|-------|----------------------|-----------|
|        | kWdia/m <sup>2</sup> |        | kWdia/m <sup>2</sup> |           | kWdia/m <sup>2</sup> |       | kWdia/m <sup>2</sup> |           |
| -----  | Ganho                | Perda  | Ganho                | Perda     | Ganho                | Perda | Ganho                | Perda     |
| 1° dia | 3,1564               | 0,0013 | 2,855                | 1,5841E-1 | 2,4731               | 0     | 2,3015               | 3,2616E-5 |
| 2° dia | 3,1560               | 0,0013 | 2,8252               | 1,5571E-4 | 2,4736               | 0     | 2,3024               | 0         |
| 3° dia | 3,1560               | 0,0013 | 2,8252               | 1,5571E-4 | 2,4736               | 0     | 2,3025               | 0         |
| 4° dia | -                    | -      | -                    | -         | -                    | -     | 2.3025               | 0         |

Tabela 4. Tabela B: simulações com o modelo de absorção da radiação solar por MÉDIA, temperatura inicial das seções próximas à 23° e  $\Delta t$  de 0,5s. Os autores, 2018

|        | 2mm água (B1)        |        | 10mm água (B2)       |           | 50mm água (B3)       |       | 100mm água (B4)      |           |
|--------|----------------------|--------|----------------------|-----------|----------------------|-------|----------------------|-----------|
|        | kWdia/m <sup>2</sup> |        | kWdia/m <sup>2</sup> |           | kWdia/m <sup>2</sup> |       | kWdia/m <sup>2</sup> |           |
| -----  | Ganho                | Perda  | Ganho                | Perda     | Ganho                | Perda | Ganho                | Perda     |
| 1° dia | 3,1647               | 0,0013 | 2,8353               | 1,5841E-4 | 2,4768               | 0     | 2,3034               | 3,2616E-5 |
| 2° dia | 3,1644               | 0,0013 | 2,8350               | 1,5570E-4 | 2,4775               | 0     | 2,3047               | 0         |
| 3° dia | 3,1644               | 0,0013 | 2,8350               | 1,5570E-4 | 2,4775               | 0     | 2,3048               | 0         |
| 4° dia | -                    | -      | -                    | -         | -                    | -     | 2,3048               | 0         |

Tabela 5. (C) Simulação com temperatura inicial das seções próximas à 7°C, modelo de absorção da radiação solar por SEÇÃO e  $\Delta t$  de 0,5s e (D) Simulação com o modelo de absorção da radiação solar por SEÇÃO, temperatura inicial das seções próximas à 23° e  $\Delta t$  de 0,25s. Os autores, 2018

|        | 10mm de água (C)     |           | 10mm água (D)        |           |
|--------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|
|        | kWdia/m <sup>2</sup> |           | kWdia/m <sup>2</sup> |           |
|        | Ganho                | Perda     | Ganho                | Perda     |
| 1° dia | 2,8248               | 0,0136    | 2,8256               | 1,5839E-4 |
| 2° dia | 2,8252               | 1,5571E-4 | 2,8253               | 1,5569E-4 |
| 3° dia | 2,8252               | 1,5571E-4 | 2,8253               | 1,5569E-4 |

## Discussão e conclusões

Este artigo confirma a precisão dos resultados do MTSF para transwalls delgadas e com propriedades da água variáveis utilizando o intervalo de tempo de meio segundo, bem como certifica que simulações com 3 dias de calibragem, e não 7 dias como utilizado em outros trabalhos de transwalls, terão coerência quando analisadas espessuras de lâmina de água entre 2 a 100mm.

Mesmo que o balanço térmico resultante tenha sido igual quando o dado de entrada para a primeira temperatura das seções foi diferente (caso A2 e C), recomenda-se que a entrada de dados fique próxima da temperatura externa nas seções mais próximas ao exterior e mais próximas à temperatura interna nas seções mais próximas ao interior no primeiro instante de simulação (meia-noite) afim de evitar o aumento dos dias de calibração.

A calibração e certificação do intervalo de tempo aqui realizados permite que novos passos nesta pesquisa sejam trilhados, como uma análise de sensibilidade dos parâmetros das transwalls delgadas e a comparação de dados medidos com dados simulados por este modelo a partir dos registros climáticos coletados.

## Agradecimentos

CAPES

Agradecemos à CAPES-Brasil (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela financiamento para o desenvolvimento desta pesquisa. Em especial, agradecemos ao Lucas Carrilho Pessoa, o 'Rajej', que incansavelmente auxiliou nas dúvidas de programação do MatLab. Rajej, muito obrigado!

## Referencias

- Cengel, Yunus A. (2007) *Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações*. São Paulo: McGraw Hill. xxv, 816 p. ISBN 9788586804588.
- Fuchs, R.; McClelland, J.f.. (1979) Passive solar heating of buildings using a transwall Structure. *Solar Energy*, [s.l.], v. 23, n. 2, p.123-128. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x\(79\)90112-9](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x(79)90112-9).
- Incropera, Frank P.; DeWitt, David P. (1996) *Fundamentals of heat and mass transfer*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, c. xxiii, 886 p. ISBN 9780471304609.
- Nayak, J. (1987a) Thermal performance of a water wall. *Building and Environment*, vol. 22, 1, páginas 83-90. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(87\)90045-X](https://doi.org/10.1016/0360-1323(87)90045-X)
- Nayak, J. (1987b) Transwall versus trombe wall: relative performance studies. *Energy Conversion & Management*, Vol. 27, No. 4, 1987, páginas 389-393. DOI: 10.1016/0196-8904(87)90117-8
- Nisbet, S.; Kwan, C. (1987) The application of the transwall to horticultural glasshouses. *Solar Energy*, [s.l.], v. 39, n. 6, p.473-482, Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x\(87\)90054-5](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x(87)90054-5).
- Nisbet, S.k.; Mthembu, N.s. (1992) Transwall modelling using effective conductivities. *Solar Energy*, [s.l.], v. 49, n. 2, p.127-138, Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x\(92\)90147-3](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x(92)90147-3).
- Sodha, M.s.; Bansal, N.k.; Ram, Sant. (1983) Periodic analysis of a transwall: A passive heating concept. *Applied Energy*, [s.l.], v. 14, n. 1, p.33-48, Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0306-2619\(83\)90026-0](http://dx.doi.org/10.1016/0306-2619(83)90026-0).
- Tiwari, G.n.; Upadhya, M.; Rai, S.n. (1991) Relative thermal performances of south walls in winter. *Energy And Buildings*, [s.l.], v. 17, n. 4, p.313-320, Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90013-s](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(91)90013-s).
- Upadhya, M.; Tiwari, G.n.; Rai, S.n. (1991) Optimum distribution of water-wall thickness in a transwall. *Energy And Buildings*, [s.l.], v. 17, n. 2, p.97-102, Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90002-k](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(91)90002-k).
- Wu, T; Lei, C. (2015a) On numerical modelling of conjugate turbulent natural convection and radiation in a differentially heated cavity. *Energy and Buildings*, Volume 91, dez. 2015, páginas 454-466. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.113>
- Wu, T; Lei, C. (2015b) Comparison of various RANS models for conjugate turbulent natural convection with radiation in a cavity. *Proceedings of CHT-15, ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer*. DOI: 10.1615/ICHMT.2015.IntSympAdvComputHeatTransf.560
- Wu, T; Lei, C. (2016a) Thermal modelling and experimental validation of a semi-transparent water wall system for Sydney climate. *Solar Energy*, volume 136, páginas 533-546. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.026>.
- WU, T; LEI, C. (2016b) CFD simulation of the thermal performance of an opaque water wall system for Australian climate. *Solar Energy*, volume 133, ago. 2016, páginas 141-154

# Desenvolvimento de modelo genérico para avaliação do impacto de dispositivos de sombreamento na ventilação natural

Development of a generic model to evaluate the impact of shading devices on natural ventilation

## Michele Marta Rossi

Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo  
Avenida Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro. CEP: 13566-590. São Carlos - SP  
michele.rossi@usp.br

## Fernanda Itkes Vale

Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo  
Avenida Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro. CEP: 13566-590. São Carlos - SP  
fernanda.vale@usp.br

## Alessandra Rodrigues Prata Shimomura

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo  
Rua do Lago, 876 – Butantã. CEP 05508-080, São Paulo, SP  
arprata@usp.br

## Karin Maria Soares Chvatal

Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo  
Avenida Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro. CEP: 13566-590. São Carlos - SP  
karin@sc.usp.br

**Manuscript Code:** 028

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

## Resumo

Em climas quentes e úmidos, predominantes em grande parte do território brasileiro, a combinação de estratégias de ventilação natural e de sombreamento das aberturas pode contribuir significativamente para a redução do condicionamento artificial e, conseqüentemente, do consumo energético nas edificações. Todavia, tanto no âmbito nacional quanto no internacional, poucas são as informações acerca do impacto do uso de dispositivos de sombreamento na ventilação natural, principalmente no que se refere à influência destes elementos nos coeficientes de pressão devido ao vento ( $C_p$ ). Este trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia de desenvolvimento de um modelo genérico que será utilizado, posteriormente, para ensaios em túnel de vento e simulações fluidodinâmicas, a fim de auxiliar na quantificação do impacto de protetores solares externos nas distribuições de pressão nas suas envoltórias e, conseqüentemente, no desempenho da ventilação natural. Este modelo é caracterizado por uma geometria regular e com dimensões equivalentes a um ambiente médio de edificações brasileiras (residenciais). A escolha por uma forma simples tem como objetivos: (a) tornar a geometria do modelo um parâmetro fixo; (b) simplificar o modelo, a fim de minimizar o efeito de parâmetros adicionais; (c) priorizar nas análises a quantificação do impacto dos dispositivos de sombreamento no desempenho da ventilação natural; e, por fim, (d) fornecer regras gerais acerca de tais impactos na eficácia da ventilação natural, de modo que as conclusões alcançadas não fiquem estritamente dependentes do caso analisado. A caracterização deste modelo genérico compreende parâmetros fixos e variáveis, elencados em três grandes classes: Classe I. Geometria; Classe II. Dispositivos de sombreamento e; Classe III. Condições de contorno. As ferramentas metodológicas utilizadas para a definição dos parâmetros se resumem em: revisão bibliográfica, levantamento de dados; análises quantitativas e qualitativas. A partir deste modelo genérico, importantes dados serão fornecidos não só à comunidade acadêmica, mas também aos profissionais simuladores.

**Palavras-chave:** Modelo genérico; Ventilação Natural; Dispositivos de sombreamento; Coeficientes de pressão devido ao vento ( $C_p$ ).

## Abstract

In hot and humid climates, the combination of natural ventilation strategies and window shading can significantly contribute to reducing energy consumption in buildings. However, there are few investigations in the literature about the impact of the use of shading devices on natural ventilation, especially regarding the influence of these elements on wind pressure coefficients ( $C_p$ ). This work aims to show a methodology to develop a generic model that will be used, afterwards, for tests in wind tunnel and fluid dynamics simulations, in order to assist in the quantification of the impact of external shading devices on the pressure distribution in their envelopes and, consequently, on natural ventilation. This model is characterized by regular geometry with dimensions equivalent to an average Brazilian room of residential buildings. The choice of a simple form has the following objectives: (a) make the geometry of the model a fixed parameter; (b) simplify the model in order to minimize the effect of additional parameters; (c) prioritize in the analyzes the quantification of the impact of shading devices on the performance of natural ventilation; and (d) provide general rules about such impacts on the efficacy of natural ventilation, so that the conclusions reached are not strictly dependent on the case under consideration. The characterization of this generic model comprises fixed and variable parameters, listed in three main classes: Class I. Geometry; Class II. Shading Devices and; Class III. Boundary conditions. This generic model definition is supported by bibliographic review, data collection; quantitative and qualitative analyzes. Through this generic model, important information will be provided to the academic community and to the professional simulators.

**Keywords:** Generic model; Natural ventilation; Shading devices; Wind pressure coefficients ( $C_p$ ).

## Introdução e estado da arte do problema

Em climas quentes e úmidos, cenário característico de grande parte do território brasileiro, o uso conjugado da ventilação natural e dos dispositivos de sombreamento pode representar uma efetiva estratégia de projeto para se atingir bons níveis de conforto térmico nas edificações (Cândido et al., 2010). No entanto, pouca informação se tem acerca da ordem de grandeza do impacto dos elementos de sombreamento externos na ventilação natural.

A ventilação natural consiste na trajetória do fluxo de ar no interior dos ambientes decorrente do diferencial de pressão gerado em suas superfícies. Este diferencial pode ser resultante da força mecânica exercida pelo vento nas superfícies da edificação, da diferença de temperatura entre os ambientes internos e externos ou ainda pela ação conjugada.

A ação mecânica dos ventos na envoltória de uma edificação pode ser avaliada através dos coeficientes de pressão locais ( $C_p$ ) que são variáveis de ponto a ponto nas superfícies. De acordo com Toledo (1999), denomina-se coeficiente de pressão o quociente adimensional da pressão dinâmica aferida em determinado ponto da fachada da edificação pela pressão dinâmica do fluxo de ar não perturbado. A obtenção destes dados pode ocorrer a partir de fontes primárias (experimentos em escala real, ensaios de modelos reduzidos em túneis de vento de camada limite atmosférica, e simulações computacionais fluidodinâmicas, as chamadas *Computational Fluid Dynamics*, CFD); ou a partir de fontes secundárias (banco de dados ou métodos analíticos) (Cóstola, Blocken & Hensen, 2009).

Os coeficientes de pressão devido ao vento, além de serem sensíveis a vários parâmetros – rugosidade do terreno, ângulo de incidência do vento, formato da edificação e presença de obstáculos em seu entorno, entre outros – são dados de entrada requeridos nos principais programas de simulação para avaliação termoenergética de edificações que fazem uso da ventilação natural, os chamados *Building Energy Simulation* (BES) (Cóstola, Blocken & Hensen, 2009). No entanto, um dos principais programas BES, o EnergyPlus (EERE, 2016), desconsidera o efeito da presença de elementos de sombreamento no seu algoritmo de cálculo do módulo de ventilação natural. Diante disso, a determinação do impacto de dispositivos de sombreamentos externos é um dado que se mostra relevante no processo de projeto de edificações que fazem uso da ventilação natural.

Na literatura científica, há trabalhos que contemplam, como objeto de estudo, a influência de elementos arquitetônicos junto às janelas ou a presença de detalhes nas fachadas da edificação como, por exemplo, protetores solares, prateleiras de luz, peitoris ventilados e sacadas (Bittencourt, Biana & Cruz, 1995; Vettorazzi et al., 2016; Castaño, 2017; Accioly, Oliveira & Bittencourt, 2016; Bittencourt & Sacramento, 2007; Chand & Krishak, 1971; Stathopoulos & Zhu, 1988; Chand, Bhargava & Krishak, 1998; Maruta, Kanda & Sato, 1998; Prianto & Depecker, 2002; Hien & Istiadji, 2003; Montazeri & Blocken, 2013; Kirimtat et al., 2016). No entanto, majoritariamente, as análises feitas são acerca do impacto destes elementos nos desempenhos térmico, lumínico ou energético de edificações. E quando o ponto focal é a ventilação, a maioria dessas investigações se referem ao impacto na velocidade ou na distribuição do fluxo de ar no ambiente.

A partir destes estudos, identifica-se uma lacuna na literatura científica. Embora a distribuição de pressão na envoltória da edificação se configure como o parâmetro motriz para a ocorrência da ventilação natural, nota-se uma preponderância da literatura em adotar geometrias lisas e de baixa porosidade como objeto de estudo, principalmente para a realização de ensaios em túneis de vento. Poucas são as investigações observadas acerca do impacto neste parâmetro, ocasionados pela presença de detalhes nas fachadas da edificação (Montazeri & Bloken, 2013), tais como dispositivos de sombreamento externos.

Este trabalho faz parte de um doutorado em andamento cujo objetivo geral é avaliar o impacto das características projetuais de diferentes dispositivos de sombreamento no desempenho da ventilação natural em um modelo genérico, através das distribuições de pressão nas suas envoltórias. Neste artigo, é apresentada a metodologia de desenvolvimento deste modelo genérico que será utilizado, posteriormente, em ensaios experimentais em túnel de vento. Os dados oriundos dos ensaios serão utilizados para a calibração desse mesmo modelo na ferramenta CFD, na qual as características projetuais dos dispositivos de sombreamento serão variadas parametricamente.

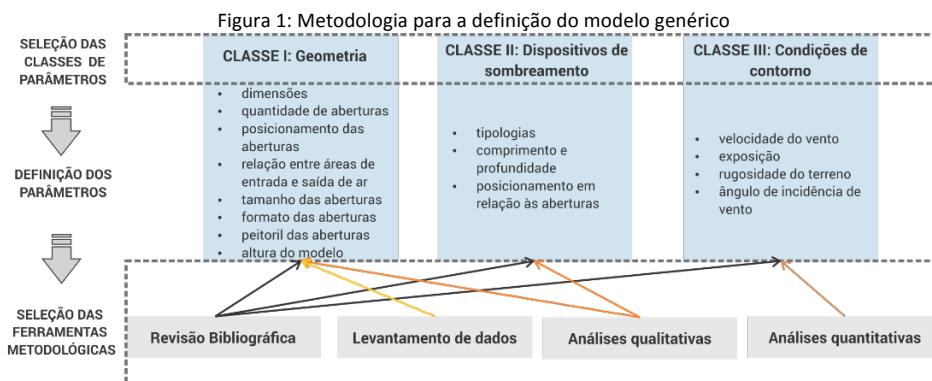
## Metodologia

A metodologia para a definição do modelo genérico se divide em três etapas: (1) Seleção das classes de parâmetros que caracterizam o modelo e suas condições de contorno; (2) Definição dos parâmetros; (3) Seleção das ferramentas metodológicas para a determinação de cada parâmetro (Figura 1). Na sequência, cada etapa é apresentada em detalhes.



### Seleção das classes de parâmetros que caracterizam o modelo e suas condições de contorno

O modelo genérico terá a função de embasar avaliações experimentais e numéricas realizadas, respectivamente, em túnel de vento de camada limite atmosférica e por meio de simulações CFD. Deste modo, o critério aplicado para a seleção dos seus parâmetros se restringe aos apontados como mais relevantes pela literatura científica para a sua respectiva modelagem nas ferramentas metodológicas descritas. Portanto, foram definidas três grandes classes, que agrupariam os parâmetros de interesse: Classe I: Geometria; Classe II: Dispositivos de sombreamento e; Classe III: Condições de contorno.



### Definição dos parâmetros que caracterizam o modelo e suas condições de contorno

Após a seleção das classes, os parâmetros relacionados à cada uma delas foram definidos. A Classe I: Geometria, engloba características tanto do modelo quanto das aberturas. A Classe II: Dispositivos de sombreamento, considera os elementos necessários para a caracterização dos elementos de sombreamento externos. E, por fim, a Classe III: Condições de contorno, referencia os parâmetros que descrevem a situação em que o modelo genérico será avaliado. No total, foram definidos 15 parâmetros.

### Seleção das ferramentas metodológicas

Após a definição dos parâmetros, que caracterizam o modelo e suas condições de contorno, foram selecionadas ferramentas metodológicas para auxiliar em sua definição, sendo elas: (a) revisão bibliográfica; (b) levantamento de dados; (c) análises qualitativas e; (d) análises quantitativas. A revisão da literatura científica foi uma ferramenta metodológica que permeou a escolha de todos os parâmetros considerados, englobando importantes referências nacionais e internacionais acerca das temáticas de ventilação natural em edificações, sombreamento das aberturas através de elementos externos e o uso combinado de tais estratégias passivas, principalmente em climas quentes e úmidos. O levantamento de dados permitiu a consulta de algumas pesquisas anteriores que catalogaram aspectos de projetos residenciais e de saletas comerciais. As análises qualitativas consistiram: (1) nos ensaios em mesa d'água do Laboratório de Conforto Ambiental do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos (IAU-USP) e; (2) na elaboração das máscaras de sombra dos dispositivos de sombreamento externos selecionados. Por fim, as análises quantitativas foram aplicadas para o estudo da velocidade média de ventos no território brasileiro.

É importante ressaltar que a mesa d'água é um modelo analógico hidráulico com grande potencial para análises qualitativas da ventilação natural por ação dos ventos em edificações (Toledo & Pereira, 2003). A mesa d'água do IAU-USP, utilizada nas análises qualitativas, é composta por dois tanques de água com capacidade de 92,5 litros (0,74 x 0,25 x 0,50 m) cada e conectados por uma bomba 0,75CV e 60 Hz. Um inversor de frequência, modelo CFW08 da WEG, atrelado à bomba é responsável por controlar a velocidade e frequência do fluxo de água. A área de ensaio apresenta 1,10 m de comprimento e 0,74m de largura.

## Resultados

Primeiramente, definiu-se que o modelo genérico teria uma geometria regular e com dimensões equivalentes a um ambiente médio de edificações brasileiras residenciais. A escolha por uma forma simples teve como objetivos: (a) manter a geometria do modelo fixa; (b) simplificar o modelo, a fim de minimizar o efeito de parâmetros adicionais; (c) priorizar nas análises a quantificação do impacto dos dispositivos de sombreamento no desempenho da ventilação

natural; e, por fim, (d) fornecer regras gerais acerca de tais impactos na eficácia da ventilação natural, de modo que as conclusões alcançadas não ficassem estritamente dependentes do caso analisado.

A caracterização deste modelo genérico, apresentada a seguir conforme a metodologia adotada e sintetizada na Tabela 1, compreende parâmetros fixos e variáveis. De acordo com Passos, Lamenha & Bittencourt (2017), devido à complexidade inerente ao fenômeno da ventilação natural é necessário fixar alguns parâmetros a fim de permitir a investigação de outros, no caso deste estudo em específico, dos dispositivos de sombreamento externos. Na sequência, são apresentadas, em detalhes, os parâmetros pertencentes a cada classe. As análises qualitativas (a partir de ensaios em mesa d' água e da elaboração das máscaras de sombra) são apreendidas em um item separado devido à sua complexidade.

Tabela 1: Tabela-resumo da definição do modelo genérico

| Classes de parâmetros            | Parâmetros  | Valores   |
|----------------------------------|---|---|
| I. Geometria                     | Dimensões do modelo                                 | 3m x 3m x 2,7m                                    |
|                                  | Quantidade de janelas                               | Duas aberturas (dispostas em faces opostas)       |
|                                  | Posicionamento das aberturas                        | Centralizada nas fachadas                         |
|                                  | Relação entre as aberturas de entrada e saída de ar | Mesma área  |
|                                  | Tamanho das aberturas                               | 1m x 1m   |
|                                  | Formato das aberturas                               | Quadradas   |
|                                  | Peitoril da abertura                                | 1,1m  |
|                                  | Altura em que o modelo será ensaiado                | Térreo  |
| II. Dispositivos de sombreamento | Tipologia   | Horizontal (DSH), Vertical (DSV), Combinado (DSC) |
|                                  | Posicionamento em relação às aberturas              | Posicionados no limiar das aberturas              |
|                                  | Dimensões (comprimento e profundidade)              | 0,5m de profundidade                              |
|                                  | Velocidade  | 0 – 5 m/s   |
| III. Condições de contorno       | Exposição   | Isolado   |
|                                  | Rugosidade  | Área aberta e plana                               |
|                                  | Ângulos de incidência do vento                      | 0° - 90° (intervalos de 15°)                      |

#### ■ Classe I- Geometria

Esta classe englobou características tanto do modelo quanto das aberturas, tais como: (a) dimensões do modelo (comprimento, largura e pé-direito); (b) quantidade de aberturas; (c) posicionamento das aberturas na fachada; (d) relação entre as aberturas de entrada e saída de ar; (e) tamanho das aberturas; (f) formato das aberturas; (g) peitoril das aberturas e; (h) altura em que o modelo será ensaiado.

**Definição das dimensões do modelo:** As dimensões de largura, comprimento e pé-direito do modelo foram definidas a partir de revisão bibliográfica e levantamento de dados de três grupos de informação: (1) Modelos fundamentais experimentais (Evola & Popov, 2006; Meroney, 2009; Karava et al, 2011); (2) Modelos residenciais de pesquisas anteriores (Rossi, 2016; Anchieta, 2016; Favretto, 2016); e (3) Modelos de edifícios de escritórios de pesquisas anteriores (Santesso, 2017; Neves et al., 2017). A primeira, apoiou-se em modelos encontrados na revisão da literatura que foram utilizados em análises experimentais, sendo seus dados aplicados ou não, posteriormente, para análises numéricas em ferramentas CFD. Já a segunda e a terceira, consistiram em levantamentos de dados em algumas pesquisas que catalogaram projetos residenciais e de edificações de escritório, principalmente saletas de escritórios. Após a verificação destas fontes, optou-se que as dimensões do modelo genérico fossem iguais as propostas por Accioly, Oliveira & Bittencourt (2016): 3m x 3m x 2,7m (largura x comprimento x pé-direito).

**Quantidade de janelas:** Segundo Marques da Silva (2010), o fluxo de ar resultante dos processos eólicos, térmicos ou ação conjunta podem caracterizar uma ventilação cruzada ou unilateral. Na primeira, as aberturas estão dispostas em fachadas opostas ou adjacentes, já na segunda se encontram localizadas na mesma fachada. Deste modo, a fim de se configurar uma situação de ventilação cruzada, optou-se por dispor duas aberturas, localizadas em faces opostas.

**Posicionamento das aberturas:** As janelas foram centralizadas nas fachadas do modelo genérico. Segundo Lechner (2009), maiores valores de pressão são encontrados no centro da face à barlavento. Bittencourt & Cândido (2008) enfatizam que quando a incidência de vento é perpendicular a abertura de entrada de ar, uma maior diferença na distribuição das pressões é observada, sendo a diferença máxima obtida se as aberturas de entrada e saída de ar forem localizadas nas máximas pressões positivas e negativas, respectivamente.

**Relação entre as aberturas de entrada e saída de ar:** Givoni (1976) observou, em suas análises, que os impactos da variação do tamanho das aberturas são mais preponderantes em ambientes com ventilação cruzada e que ganhos efetivos na velocidade interna do ar podem ser alcançados com o incremento simultâneo das áreas de aberturas de entrada e saída de ar. Diante destas constatações, foi definido que as janelas no modelo genérico seriam mantidas idênticas.

**Tamanho das aberturas:** As aberturas do modelo genérico são de 1,0m x 1,0m. Análises qualitativas do fluxo de ar realizados em mesa d' água foram fundamentais para aperfeiçoar a definição deste parâmetro. Os resultados destas análises são apresentados no item "Análises qualitativas: visualizações analógicas em mesa d' água e elaboração de máscaras de sombra".

**Formato das aberturas:** Sobin (1981) *apud* Bittencout e Cândido (2008) e Givoni (1991) investigou, a partir de ensaios em túnel de vento, o impacto da variação do formato das aberturas (retangular, vertical ou quadrada) na velocidade do ar interna. Embora, o formato retangular seja apontado, nesta referência, como preponderante em relação as demais formas observadas, optou-se por aberturas quadradas, uma vez que os ensaios qualitativos em mesa d'água (ver item "Análises qualitativas: visualizações analógicas em mesa d'água e elaboração de máscaras de sombra") apontaram uma maior abrangência do fluxo de ar no ambiente interno para valores menores de largura de abertura. Em aberturas com dimensões de largura maiores, o fluxo se mostrou mais linearizado.

**Peitoril das aberturas:** O levantamento de dados de projetos residenciais indicou uma preponderância de aberturas com peitoril de 1,1m para os ambientes de maior permanência (sala e dormitórios). Logo, este valor foi adotado.

Altura em que o modelo será ensaiado: O modelo analisado configurará uma situação térrea. Para averiguar de forma efetiva o impacto dos dispositivos de sombreamento externos na ventilação natural, a partir da variação de tal parâmetro, seria necessário a confecção de um modelo que reproduzisse um módulo sobre o outro, uma vez que em altura o dispositivo de sombreamento do módulo inferior poderia facilmente impactar o desempenho da ventilação natural do módulo superior, o que agregaria complexidade a análise.

- Classe II – Dispositivos de sombreamento externos

Esta classe considerou os elementos necessários para a caracterização dos elementos de sombreamento externos como: (a) tipologia; (b) dimensões (comprimento e profundidade) e; (c) posicionamento dos elementos em relação às aberturas (se serão localizados no limite da abertura ou apresentarão algum afastamento em relação às mesmas).

**Tipologias:** Três tipologias de elementos de sombreamento externos foram selecionadas para compor as variações do modelo genérico: dispositivos de sombreamento horizontal, vertical e combinado, por serem as formas mais usualmente encontradas.

**Dimensões e posicionamento dos elementos em relação às aberturas:** As definições de tais parâmetros foram embasadas pelas análises qualitativas: visualizações analógicas em mesa d'água e elaboração de máscaras de sombra, sendo apresentadas neste respectivo item.

- Classe III – Condições de contorno

Esta classe referenciou os parâmetros que descrevem a situação em que o modelo genérico será avaliado: (a) velocidade do vento; (b) grau de exposição do modelo (modelo isolado ou que considere o entorno); (c) rugosidade do terreno (terreno livre de interferência, subúrbio, urbano, entre outros); e por fim, (d) ângulos de incidência do vento.

**Velocidade:** Inicialmente, a partir da análise do Atlas de potencial eólico brasileiro (Amarante et al., 2001) foram definidas cidades de menor e maior potencial eólico nas macrorregiões: norte (Manaus e Soure); nordeste (Fortaleza e Vitória da Conquista); centro-oeste (Cuiabá e Campo Grande); sudeste (Arraial do Cabo e São Paulo); sul (Curitiba e Santa Marta). No entanto, como os dados reunidos neste documento são resultantes de uma modelagem numérica com o *software* MesoMap e seus resultados representam regimes de ventos na altura de 50m, julgou-se coerente para o caso em questão a análise dos arquivos climáticos desenvolvidos por Roriz (2012) e atualizados em 2016 (LabEEE, 2016) tendo como base medições meteorológicas realizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), cuja aferição dos regimes de vento ocorrem na altura de 10m. Para a análise destes arquivos, foram definidos intervalos de variação da velocidade do vento a serem observados, tais como: < 2; de 2 a 3; de 3 a 5; 5 a 9 e >9 m/s. A aplicação deste critério permitiu delinear o intervalo de velocidade de vento com maior frequência de ocorrência. Em geral, as velocidades de vento de até 5 m/s são as mais recorrentes dentre as cidades analisadas, sendo preponderantes os intervalos de <2 m/s e de 2 a 3 m/s.

Exposição: De acordo com Leite e Frota (2013a, 2013b), a complexidade inerente do  $C_p$  à variação de aspectos como o efeito do entorno imediato, formato das edificações, ângulos de incidência de vento, limitam a aplicação dos dados provenientes de diversos estudos sobre a avaliação de  $C_p$  realizados em modelos paralelepípedos e isolados. Entretanto, a adoção de um modelo isolado foi estabelecida para este estudo a fim de diminuir a influência de parâmetros adicionais na análise das variações nas distribuições de pressões decorrentes da inclusão de protetores solares externos.

Rugosidade do terreno: A Camada Limite Atmosférica (CLA) varia da velocidade de vento igual a zero, no contato com a superfície, até a velocidade de escoamento livre (Marques da Silva, 2010). Deste modo, as variações de coeficientes de rugosidade do terreno resultam em diferentes espessuras de CLA, além de alterar o gradiente de velocidade de vento. Por este motivo, optou-se em considerar um coeficiente de rugosidade do terreno equivalente a uma área aberta e plana.

Ângulo de incidência do vento: O ângulo que o vento incide sobre a edificação é primordial na configuração das distribuições de pressão nas suas respectivas fachadas. Logo, os ângulos de incidência de vento serão variados de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  em intervalos de  $15^\circ$ . Por se tratar de uma geometria regular, os dados para as demais situações poderão ser facilmente deduzidos.

▪ Análises qualitativas: visualizações analógicas em mesa d'água e elaboração de máscaras de sombra  
 Análises qualitativas foram utilizadas: 1) Nas visualizações do fluxo de ar a partir de ensaios em mesa d'água e; 2) Na elaboração de máscaras de sombra. Tais análises, auxiliaram na definição do formato e das dimensões das aberturas, e das características dos dispositivos de sombreamento externos.

O modelo avaliado nos ensaios em mesa d'água apresenta as dimensões do modelo genérico (3m x 3m x 2,7m de pé-direito), peitoril padrão de 1,10m e aberturas centralizadas e em faces opostas. Devido à limitação da mesa d'água, em permitir visualizações analógicas bidimensionais de um fenômeno que é tridimensional, foram realizados ensaios em planta e em corte longitudinal (Tabela 2).

Tabela 2: Visualizações do fluxo de ar em mesa d'água: avaliações do impacto da largura, altura das aberturas e da presença de dispositivos de sombreamento externos (horizontal e vertical).

| Ensaio em planta             |                   |                       |                       |                       |
|------------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Vão                          | Caso sem proteção | Proteção solar (0,1m) | Proteção solar (0,5m) | Proteção solar (1,0m) |
| 0,6                          |                   |                       |                       |                       |
| 1,0                          |                   |                       |                       |                       |
| 2,0                          |                   |                       |                       |                       |
| Ensaio em corte longitudinal |                   |                       |                       |                       |
| Vão                          | Caso sem proteção | Proteção solar (0,1m) | Proteção solar (0,5m) | Proteção solar (1,0m) |
| 0,6                          |                   |                       |                       |                       |
| 1,0                          |                   |                       |                       |                       |

Os ensaios dos modelos em planta auxiliaram na verificação dos impactos no fluxo de ar: (a) de dispositivos de sombreamento externos verticais e; (b) da variação da largura da abertura (0,6m; 1,0m; 1,2m; 1,6m; 2,0m). Já, a partir dos ensaios em corte longitudinal se avaliou o impacto no fluxo de ar: (c) da presença dos dispositivos de sombreamento externos horizontais e; (d) da variação da altura da abertura (0,6m e 1,0m). Ambos os ensaios

contemplaram variações nas dimensões de profundidade dos elementos de sombreamento externos (0,1m; 0,5m e; 1,0m).

Para a realização dos ensaios foram confeccionadas maquetes físicas em acrílico transparente de 3mm por ser um material resistente, impermeável e não interferir nas visualizações. Os modelos reduzidos foram produzidos na escala de 1:10, sendo que a altura dos elementos foi de 5cm. As paredes com aberturas tiveram seus elementos alterados durante os testes, a fim de representar as diferentes larguras (modelos em planta) ou alturas (modelos em corte longitudinal) das aberturas. Os elementos que caracterizaram os dispositivos de sombreamento também foram trocados entre um teste e outro. A fixação das peças variáveis entre um teste e outro nas demais que eram fixas ocorreram a partir do uso de clorofórmio. No total, foram realizados 28 ensaios, sendo os resultados de 20 aqui apresentados. Os resultados referentes aos casos em planta de vão de 1,2m e 1,6m foram omitidos, uma vez que apresentaram padrão semelhante aos observados nos vãos de 1,0m e 2,0m, respectivamente.

As visualizações em mesa d'água indicam que maiores dimensões tanto de altura como de largura das aberturas ocasionam fluxos de ar mais linearizados. Além disso, este incremento resulta na ampliação das zonas de sombra de vento dentro do ambiente, ao passo que diminuiu o potencial de recirculação do ar. Diante destes dados, optou-se pela abertura quadrada de aresta de 1,0m para o modelo genérico. Esta dimensão de vão ainda proporciona recirculações de ar como observado no vão de 0,6m, o que auxilia na maior distribuição do ar no ambiente interno.

Quanto à variação na dimensão de profundidade tanto dos protetores horizontais quanto verticais, pouca influência no fluxo de ar é notada quando é acrescido um protetor equivalente à 0,1m, e maiores interferências são observadas a partir da inclusão dos protetores de 0,5m e 1,0m. Optou-se pelos protetores de 0,5m por possuírem uma dimensão mais realista. Quanto ao impacto na distribuição de fluxo, a opção de 0,5m ainda continua sendo a mais preponderante, por permitir maiores recirculações de ar, diminuindo assim as zonas de sombra de vento no interior do ambiente analisado.

A partir dos ensaios em mesa d'água, estabeleceu-se que os protetores solares, independente da tipologia (horizontal, vertical ou combinado) apresentariam elementos com 0,5m de profundidade. Além disso, tais elementos seriam locados no limiar das janelas e suas dimensões de comprimento não ultrapassariam as da abertura. Tendo isso considerado, utilizou-se o transferidor auxiliar para verificar os ângulos verticais frontais ( $\alpha$ ), horizontais ( $\beta$ ) e verticais laterais ( $\gamma$ ), sendo estes respectivamente:  $63^\circ$ ,  $63^\circ$  e  $0^\circ$ . A fim de fornecer uma avaliação mais abrangente do potencial de sombreamento de tais dispositivos, foram elaboradas as máscaras de sombra correspondentes e aplicadas sobre as cartas solares para latitudes de  $4^\circ\text{N}$  a  $32^\circ\text{S}$ , considerando intervalos de  $4^\circ$ . Este critério de avaliação foi reproduzido para as três tipologias de dispositivos de sombreamento (horizontal, vertical ou combinado). Considerou-se que a abertura do modelo genérico que receberia a proteção dos dispositivos de sombreamento externos está localizada na fachada Norte, devido ao ganho solar significativo durante o ano nesta orientação para as diferentes latitudes do território brasileiro.

## Discussão e conclusões

A ventilação natural é um fenômeno complexo e sensível a vários parâmetros. Logo, a elaboração de um modelo genérico para avaliação do impacto de dispositivos de sombreamento nas distribuições de pressão nas suas envoltórias, representadas pelos coeficientes de pressão ( $C_p$ ), constituiu em um processo minucioso de busca na literatura para melhor embasar as definições dos parâmetros que caracterizariam o modelo e suas condições de contorno. Como o modelo genérico será posteriormente ensaiado em túnel de vento, que se trata de uma ferramenta experimental custosa e de difícil acesso, o processo de sua definição deveria ser criterioso a fim de se caracterizar de modo coerente todos os parâmetros necessários para a modelagem nesta ferramenta experimental, como também para permitir a sua replicação em ferramentas de simulação computacional fluidodinâmica. As análises qualitativas de visualizações analógicas na mesa d'água, que consiste em um experimento de baixo custo, relativamente simples e rápido, contribuíram de modo significativo nas definições relacionadas às dimensões das aberturas e dos dispositivos de sombreamento externos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa Unificado de Bolsas de Estudos para Estudantes de Graduação (PUB) da USP, respectivamente, pelas bolsas de fomento de doutorado e de iniciação científica. Ademais, aos técnicos dos laboratórios do IAU-USP, Pedro Mattia, José Dibo e Paulo Pratavieira pelo assessoramento nos ensaios experimentais em mesa d'água. E por fim, aos engenheiros Gilder Nader e Gabriel Borelli Martins, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) pelas valiosas contribuições ao longo do processo de definição do modelo genérico.

## Referências

- Accioly, L., Oliveira, P. & Bittencourt, L. (2016). A influência da forma de prateleiras de luz na captação e distribuição interna da ventilação natural em um ambiente. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 16., 2016, São Paulo. Anais...São Paulo: ENTAC, p.417-427.
- Amarante, O. A., Brower, M., Zack, J. & Eolica, C. S. E. (2001) Atlas do potencial eólico brasileiro. Atlas do potencial eólico brasileiro, Ministerio de Minas e Energia Eletrobras.
- Anchieta, C. (2016). Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of solar incidence and shading devices. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia / IAU) - Universidade de São Paulo, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
- Bittencourt, L. & Cândido, C. (2008). Introdução à ventilação natural. Maceió: EDUFAL, 2008.
- Bittencourt, L. S. & Sacramento, S. (2007). Estudo do desempenho do peitoril ventilado para aumentar a ventilação natural em escolas de Maceió/AL. p. 59–69.
- Bittencourt, L., Biana, G. & Cruz, J. M. (1995). Efeito dos protetores solares verticais e horizontais na ventilação natural de salas de aula do 2º grau In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 3 e Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 1, 1995, Gramado. Anais...Gramado: ENCAC/ELACAC, p.383-388.
- Cândido, C., Dear, R. J. de, Lamberts, R. & Bittencourt, L. (2010). Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. *Building and environment*, v. 45, p. 222-229.
- Castaño, H.F.M. (2017). Impacto de dispositivos de sombreamento externos e muro na ventilação natural e no desempenho térmico de uma habitação de interesse social térrea. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia / IAU) - Universidade de São Paulo, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
- Chand, I. & Krishak, N. L. V. (1971). Laboratory studies of the effect of louvers on room air motion. *Building Science*, v. 6, n. 4, p. 247–252, 1971.
- Chand, I., Bhargava, P. K. & Krishak, N. L. V. (1998). Effect of balconies on ventilation inducing aeromotive force on low-rise buildings. *Building and Environment*, v. 33, n. 6, p. 385–396.
- Cóstola, D., Blocken, B. & Hensen, J. L. M. (2009). Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. *Building and Environment*, v. 44, n. 10, p. 2027–2036.
- EERE - Department of Energy Efficiency and Renewable Energy. EnergyPlus. Version 8.6.0. US: Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, 2016a. Disponível em: <[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus\\_about.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm)>. Acesso em: 08/jun/ 2016.
- Evola, G.; Popov, V. (2008). Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. *Energy and Buildings*, v. 38, n. 5, p. 491–501, 2006.
- Favretto, A.P.O. (2016). Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of opaque envelope. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia / IAU) - Universidade de São Paulo, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.
- Givoni, B. (1976). *Man, climate and architecture*. 2 ed. London: Applied Science.Publishers.
- Hien, W. N. & Istiadji, A. D. (2003). Effects of external shading devices on daylighting and natural ventilation. Eighth International IBPSA Conference Eindhoven, Netherlands August 11-14, 2003, p. 475–482.
- Karava, P., Stathopoulos, T., Athienitis, A.K. (2011). Airflow assessment in cross- ventilated buildings with operable façade elements. *Build.Environ.*46, 266–279.
- Kirimtat, A. et al. (2016). Review of simulation modeling for shading devices in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 53, p. 23–49.
- LABEEE - Laboratório de Eficiência em Edificações. (2016). Arquivos climáticos INMET 2016. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações.
- Leite, R.C.V. & Frota, A.B. (2013a). Procedimentos para determinação de coeficientes de pressão em diferentes condições de adensamento urbano. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 12 e Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 8, Brasília. Anais...Brasília: ENCAC/ELACAC.
- Leite, R.C.V. & Frota, A.B. (2013b). Avaliação de coeficientes de pressão em edifícios em meio urbano adensado. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 12 e Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 8, Brasília. Anais...Brasília: ENCAC/ELACAC.
- Marques da Silva, F. (2010). Aplicação da ventilação natural e mista em edifícios: as ações introdutoras da ventilação natural. In: *Cadernos Edifícios*, n.6, p. 7-26.
- Maruta, E., Kanda, M. & Sato, J. (1998). Effects on surface roughness for wind pressure on glass and cladding of buildings. v. 76, p. 651–663.
- Meroney, R. N. (2009). CFD Prediction of Airflow in Buildings for Natural Ventilation Prepared for 11 th Americas Conference on Wind Engineering San Juan , Puerto Rico CFD Prediction of Airflow in Buildings for Natural Ventilation. p. 1–11.
- Montazeri, H. & Blocken, B. (2013). CFD simulation of wind-induced pressure coef fi cients on buildings with and without balconies : Validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, v. 60, p. 137–149.
- Neves, L. O., Manoel, R. P.; Chvatal, K.; Santesso, C. (2017) Envelope design of mixed-mode office buildings: theory versus practice. In: *Passive and Low Energy Architecture*, 2017, Edimburgo. PLEA.

- Passos, I.C.S., Lamenha, M. & Bittencourt, L.S. (2017). Análise de pressões externas em edifício residencial multifamiliar para fins de ventilação natural. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 14 e Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 10, Balneário Camboriu. Anais... Balneário Camboriu: ENCAC/ELACAC.
- Prianto, E. & Depecker, P. (2002). Characteristic of airflow as the effect of balcony, opening design and internal division on indoor velocity A case study of traditional dwelling in urban living quarter in tropical humid region. v. 34, p. 401-409.
- Roriz, M. (2012). Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. Relatório Interno. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>. Acesso em: 22 de março de 2013.
- Rossi, M.M. (2016). Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of natural ventilation. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia / IAU) - Universidade de São Paulo, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.
- Santesso, C. A. (2017). Integração da ventilação híbrida e da iluminação natural em saletas comerciais na cidade de São Paulo: influência de parâmetros de projeto. 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Sobin, H. J. (1981) Window design for passive ventilative cooling: an experimental model-scale study, Proc. Int. Passive and Hybrid Cooling Conf., Miami Beach, FL, 1981, Am. Section of the Int. Solar Energy Soc., pp. 191-195.
- Stathopoulos, T. & Zhu, X. (1988). Wind pressures on buildings with appurtenances. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.31, p. 265-281.
- Toledo, A. M.; Pereira, F. O. R. (2003). O potencial da Mesa d' água para a visualização analógica da ventilação natural em edifícios. In: VII ENCAC - Encontros Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2003, Curitiba. Anais... do VII ENCAC.
- Toledo, E. (1999). Ventilação Natural das habitações. Coordenação da publicação brasileira por Alexandre Toledo. Maceió: EDUFAL, 1999.
- Vettorazzi, E., Sacht, H. M., Langner, M. & Camacho, D.J. (2016). Proposta de dispositivo para aumentar o desempenho de janelas e fachadas em termos de ventilação natural e auxiliar no controle da radiação solar direta. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 16., 2016, São Paulo. Anais... São Paulo: ENTAC, p.1839-1852.

## Iluminação natural em salas de aula: estudo de caso no semiárido brasileiro

### Daylighting in classrooms: case in Brazilian semi-arid region

#### Lilianne de Queiroz Leal

Filiación: Universidade Federal de Campina Grande - Campus Pombal/PB

Dirección: Rua Jario Vieira Feitosa, nº 1770, Bairro dos Pereiros, Pombal/PB, Brasil, CP: 58.840-000

Correo: lilianne.queiroz@ccta.ufcg.edu.br

#### Lúcia Helena Aires Martins

Filiación: Instituto Federal do Sergipe – Campus Estância

Dirección: Rua João Café Filho, nº 264, Cidade Nova, Estância/SE, Brasil, CP: 49.200-000

Correo: lucia.martins@ifs.edu.br

**Manuscript Code:** 30

**Date of Acceptance/Reception:** 07.07.2018/XX.XX.2018

#### Resumo

Este artigo investiga o desempenho da iluminação natural em ambientes educacionais em instituição de ensino localizada na cidade de Pombal/Paraíba, região do semiárido brasileiro. Modelos tridimensionais de salas de aula com diferentes dispositivos de proteção solar foram desenvolvidos no software *Rhinoceros*, com base no levantamento das características construtivas de sala padrão da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Com a variação da dimensão, localização e inclinação das proteções solares, os modelos foram definidos como: a. Base (B), que representa a condição atual - sem proteção; b. Marquise (M); c. Prateleira de luz Interna (PI); d. Prateleira Mista – interna e externa (PM); e. Brise horizontal (B0) e inclinado à 15° e 30° (B15 e B30) e a combinação de Prateleira e Brise, sendo horizontal (PB0), à 15° (PB15) e 30° (PB30). Por meio de plugin de simulação computacional de métricas dinâmicas, *Diva-for-Rhino* versão 4.0, os ambientes hipotéticos foram avaliados quanto a autonomia espacial da luz natural (sDA – *Spatial Daylight Autonomy*), bem como a iluminância excessiva (*Excessive Useful Daylight Illuminance* – eUDI), considerando usuários passivos. Para análise foram empregados dois critérios recomendados pela IES LM-83-12 (Illuminating Engineering Society, 2013) e por MARDALJEVIK *et al.* (2011), sendo eles: o percentual de área autônoma com iluminâncias acima de 300lux (DA<sub>>300lux</sub>) e o percentual anual de iluminâncias acima de 3000lux (eUDI<sub>>3000lux</sub>). Ainda, foi verificado o comportamento das iluminâncias entre os níveis de 300lux e 3000lux nos períodos de solstícios de verão e inverno pela manhã e à tarde. Constatou-se que os níveis de iluminação da sala de aula atual atingem iluminâncias acima do recomendado. No entanto, a adição das proteções solares culminou na redução da condição excessiva de iluminação. Os dispositivos horizontais, como as marquises e as prateleiras sem inclinação, promoveram maior uniformidade e mitigaram a incidência de fontes

diretas de luz. Nos solstícios de inverno e verão foram registradas as maiores frequências de iluminâncias entre 300 e 3000lux, atingindo as máximas nos pontos mais próximos das aberturas.

**Palavras-chaves:** Iluminação natural, proteção solar, sala de aula, simulação computacional.

#### Abstract

This article studies daylighting performances in classrooms in university located in Pombal, city of Paraíba, Brazilian semi-arid region. Computer models of classrooms with different shading devices were developed in Rhinoceros software from construction features of standard classroom of Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). To check the suitability of dynamic measurements of daylighting performance, computer simulations of the original configuration of the space and the proposed use of shading devices in openings were made. The models were defined by dimension, position and shading devices angles in openings: a. Base (B); b. overhang; c. internal light shelf; d. light shelf; e. horizontal and angles louvers (15° and 30°) and light shelf and louver combination, horizontal and angular (15° and 30°). The hypothetical rooms were evaluated with dynamic simulations with *Diva-for-Rhino* versão 4, *Spatial Daylight Autonomy and Excessive Useful Daylight Illuminance* – eUDI to passive users. For this analysis, were applied recommended criteria by IES LM-83-12 (Illuminating Engineering Society, 2013) and MARDALJEVIK *et al.* (2011): autonomy area with illuminance above 300lux ( $DA_{>300lux}$ ) and excessive area with illuminance above 3000lux ( $eUDI_{>3000lux}$ ). Thus, was investigated the solstice's periods with illuminance levels between 300lux and 3000lux in the morning and in the afternoon. Daylighting in actual room reached high levels and the shading devices insertion decreased the excessive illuminance. Overhangs and light shelves increased the uniformity and daylight incidence. In winter and summer solstice's were found the biggest frequencies of illuminances between 300lux e 3000lux, reaching the high levels next to the openings.

**Keywords:** daylighting, shading devices, classrooms, computer simulation,

## Introdução

As atividades ligadas à Arquitetura e à Engenharia influenciam direta e indiretamente a qualidade de vida das pessoas, através de um bom desempenho físico da edificação proporcionam aos seus usuários condições mínimas de saúde e bem-estar. O desempenho das edificações tem sido frequentemente abordado em diversos estudos analisando, principalmente, as condições de conforto visual e térmico. É importante destacar que as condições de conforto podem ser influenciadas pela disposição dos espaços do edifício, dos tipos e posição dos elementos de fachada, dos materiais utilizados, da forma, da orientação solar e da relação com o entorno.

O conforto visual para Lamberts, Pereira e Dutra (1997) é entendido como a existência de condições mínimas no ambiente construído, para que o ser humano possa realizar tarefas visuais com acuidade e precisão, sem precisar de grandes esforços e com reduzidos riscos de acidentes e prejuízos à visão. Quanto mais complexa a tarefa a ser desenvolvida e maior a idade da pessoa, maior também deverá ser o nível de iluminação. O desempenho lumínico de um ambiente construído abrange o nível de iluminação, que varia de acordo com a atividade humana a ser exercida no interior da edificação, e os pontos de ofuscamento que geralmente prejudicam a visibilidade e causam desconforto.

A estrutura física dos ambientes educacionais e suas características arquitetônicas interferem no conforto térmico, acústico e visual e são aspectos fundamentais no processo de aprendizagem dos estudantes. É muito importante analisar a qualidade destes espaços para avaliar como estas necessidades são atingidas nos ambientes escolares. De acordo com Kowaltowski (2011), nos espaços escolares “as questões de conforto abordam diversos fatores, tais como a qualidade do ar, condições de ventilação, de comunicação verbal, os níveis de iluminação, a disponibilidade de espaço, os materiais de acabamento”.

A luz natural era aproveitada ao máximo antes do uso da iluminação artificial e era vista como o modo necessário e econômico de iluminar os edifícios. O uso indiscriminado da iluminação artificial, mesmo quando a iluminação natural é possível durante boa parte do dia, evidencia a necessidade de rever os padrões de uso da iluminação artificial, buscando-se uma maior economia de energia nas edificações (LIMA, SILVEIRA, 2013). As características da edificação são determinantes para um bom aproveitamento da luz natural e seu uso traz diversos benefícios, dentre os quais pode-se destacar o contato com o meio exterior, uma melhor qualidade da iluminação e os benefícios psicofisiológicos para os usuários dos espaços.

Avaliar o desempenho lumínico e térmico de edificações é uma tarefa complexa que envolve grande quantidade de variáveis interdependentes, o advento do computador foi fundamental para o desenvolvimento dos modelos físicos que representam o comportamento térmico e energético de edificações, permitindo a simulação de diferentes cenários (MENDES *et al.*, 2005). Ressaltando a necessidade de melhorar os níveis de iluminação nos ambientes, reduzir a radiação solar direta e a carga térmica, este artigo tem como objetivo investigar o desempenho da luz natural em sala de aula através de simulação computacional de diferentes modelos de proteção solar nas aberturas em região do semiárido brasileiro.

## Estado da arte do problema



A contribuição da luz do dia para o projeto de construção com eficiência energética e para a criação de um ambiente agradável que ofereça conforto visual a seus usuários tem sido objeto de estudo há anos. MERESI (2016) desenvolveu uma pesquisa sobre o desempenho da iluminação natural em uma sala de aula típica na cidade de Atenas, na Grécia. O sistema escolhido para estudo consiste em uma prateleira de luz (para sombreamento e redirecionamento de luz) e persianas externas móveis semitransparentes (que podem ser ajustados de acordo com as necessidades dos ocupantes). Os resultados individuais e as conclusões apresentaram um ótimo desempenho do sistema, a prateleira externa de luz, posicionada a 2,00 m do piso, com largura de  $0,80 \text{ m} \pm 0,20 \text{ m}$ , inclinada entre  $10^\circ$  e  $20^\circ$  (parte externa superior), com um índice de reflexão de 90%, em combinação com as persianas semitransparentes externas móveis, contribuíram para uma melhor distribuição da luz e garantiram a proteção ao brilho em excesso no espaço estudado.

A influência dos elementos de proteção solar no comportamento da iluminação natural também foi alvo do estudo desenvolvido por Warriier e Raphael (2017) em Chennai na Índia, a pesquisa analisou através de experimentos e simulações a interferência das prateleiras de luz no desempenho da luz natural. Os experimentos mostraram que um aumento de 21% na iluminância pode ser conseguido usando prateleiras de luz horizontais feitas de alumínio ou espelho de vidro, ao girar a prateleira de luz externa, é obtido um aumento de quase três vezes na iluminação. Através de simulações usando Radiance descobriu-se que a maioria das suposições comuns sobre o desempenho das prateleiras de luz não são válidas, especialmente no caso de prateleiras de luz horizontais planas. Em 30% dos casos simulados, verificou-se que as prateleiras de luz horizontais aumentam a iluminância perto da janela, aumentando assim a possibilidade de ofuscamento, esse tipo de problema pode ser eliminado usando uma prateleira de luz rotativa. O estudo ressaltou ainda a importância do planejamento e análise do desempenho das proteções solares antes da construção das edificações, avaliando cada caso para encontrar a melhor solução.

Na pesquisa de Carvalho (2014), sobre o desempenho da iluminação natural em ambientes escolares na cidade de Natal-RN, os resultados comprovaram que a obtenção de uma iluminação natural com qualidade depende principalmente da eficácia do sistema de sombreamento para evitar o ofuscamento, o qual é principal causa do desconforto lumínico. Os modelos analisados foram salas de aula de dimensões  $7,20\text{m} \times 7,20\text{m}$ , com janelas com Percentual de Abertura de Fachada (PAF) de 20%, 40% e 50% e, com dispositivos de sombreamento como marquise, marquise inclinada, marquise com proteção lateral, marquise com vista frontal, marquise simples com três brises horizontais, marquise dupla, marquise dupla com três brises horizontais e o a prateleira de luz. Dentre os dispositivos analisados o melhor desempenho encontrado foi nos modelos que utilizaram a prateleira de luz e PAF de 20%, 40% e 50%.

Dentro desse contexto, estudos sobre o desempenho da luz natural utilizando a simulação computacional surgem como ferramentas importantes no processo projetual, auxiliando os projetistas nas escolhas dos parâmetros construtivos e tipos de materiais. Em projetos de ambientes escolares uma atenção maior deve ser dada, visto que a luz constitui instrumento fundamental para o pleno desempenho visual na execução das tarefas e conseqüentemente no processo de aprendizagem.

## Metodologia

O procedimento foi dividido em quatro etapas: (1) Definição do local; (2) Caracterização dos modelos; (3) Modelagem e simulação computacional; e (4) Indicadores de desempenho.

### Definição do local

O edifício analisado está localizado no Bloco Central de Aulas da Universidade Federal de Campina Grande, campus Pombal, Paraíba. Inserida na região nordeste delimitada pelo semiárido brasileiro, é caracterizada pelo baixo índice pluviométrico e predominância de céu claro durante todo o ano. Composta por dois pavimentos, a edificação apresenta 7 salas de aula convencionais com aberturas dispostas à orientação norte-sul. Todos os ambientes são iluminados naturalmente por meio de aberturas laterais, tendo a fonte artificial complementar, com proteção interna do tipo persiana utilizada esporadicamente.

Localizada na orientação sul, o objeto de estudo é um ambiente representativo da sala de aula, cujas dimensões internas são de 7,85m de comprimento, 7,50m de profundidade e pé direito com 3,35m. Quanto às aberturas, a sala apresenta quatro janelas laterais, direcionadas à orientação sul com dimensões de  $3,80\text{m} \times 1,70\text{m}$  e peitoril de 1,20m (Figura 1b e Figura 1). A parede à oeste não apresenta edifícios vizinhos e a leste é adjacente a outra sala de mesma dimensão.

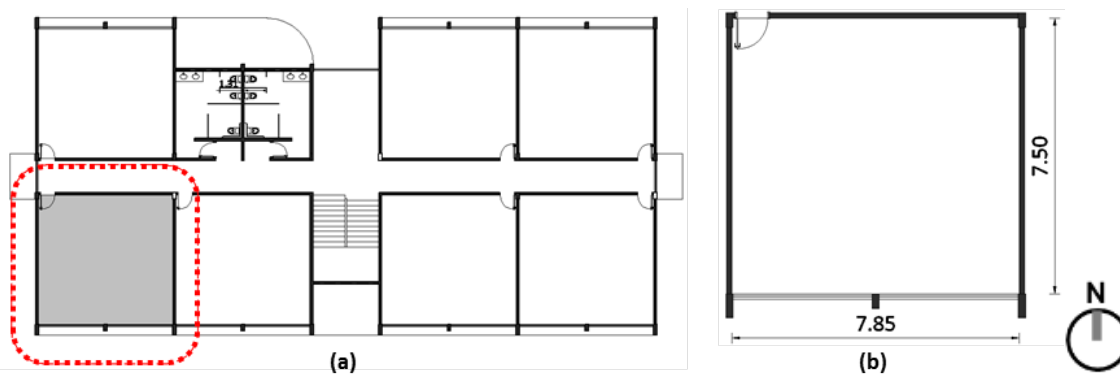


Figura 1. (a) Planta baixa pavimento superior e (b) planta baixa da sala de aula. Desenvolvido pelos Autores (2018).

### Caracterização dos modelos

Este estudo enfatiza a melhoria do desempenho no sistema de redirecionamento da iluminação natural, adotando-se como variáveis: a dimensão, inclinação e localização de proteções solares. O modelo Base (B) representa o ambiente sem dispositivo de proteção solar, sendo os níveis de iluminância controlados apenas pela transmitância do vidro, que neste caso é fixo em todo o ano.

Atualmente o edifício não apresenta nenhum sistema de transporte de luz e para propor melhorias ao espaço foram analisados modelos com sistemas fixos para comparação com a situação corrente/atual. Para tanto, os modelos foram denominados como: a. Base (B), que representa a condição atual - sem proteção; b. Marquise (M) na altura da verga da janela; c. Prateleira de luz Interna (PI) a 1,20m do peitoril a 2,30m do piso; d. Prateleira Mista – interna e externa (PM) a 2,30m do piso; e. Brise horizontal (B0) e inclinado à 15° e 30° (B15 e B30) e a combinação de Prateleira e Brise, sendo horizontal PB0, à 15° (PB15) e 30° (PB30), conforme ilustrado na Figura 2.

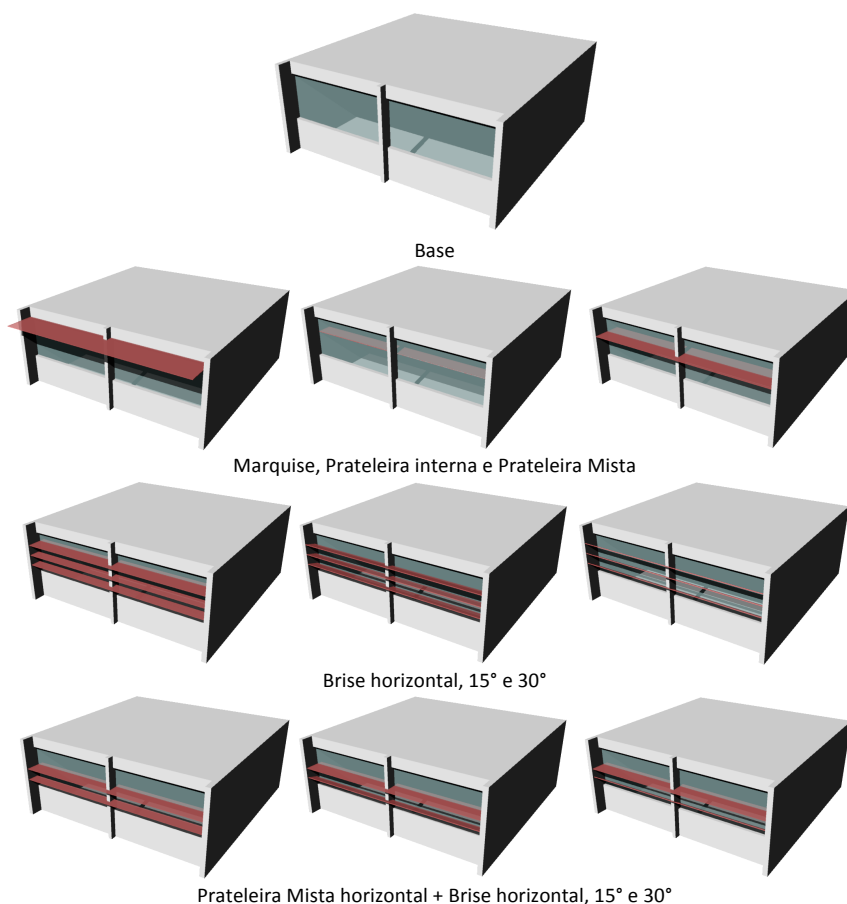


Figura 2. Modelos estudados. Desenvolvido pelos autores (2018).

As propriedades das superfícies foram definidas no DIVA-for-Rhino, por inserção de refletâncias, especularidades e rugosidade. Para tal, adotaram-se como parâmetro fixo as refletâncias de 30%, 50% e 80% no piso, paredes e forro, respectivamente. A transmissão luminosa do vidro é de 90% com reflexão de 6,7% e as proteções solares de espessura 5cm e refletividade de 90%.

### Modelagem e simulação computacional

Os modelos foram simulados no plugin Diva-for-Rhino versão 4.0. Essa interface utiliza os algoritmos do Radiance/Daysim para realização de simulação dinâmica que prediz a eficiência da iluminação baseada em arquivos climáticos – Climate-Based Daylight Modelling – CBDM (REINHART, 2010; SOLEMMMA, 2018; Robert McNeel e Associates, 2018). O modelo paramétrico foi construído no plugin *Grasshopper*, definindo as dimensões e posições das geometrias. Apesar de estar localizado no município de Pombal/Paraíba, 6°46' S e 37°48' O, utilizou-se o arquivo referência (TRY) de cidade com características climáticas similares - Patos/PB, extraídos da base de dados do LabEEE (2018), por não apresentar registro do ano típico. A malha de pontos foi distribuída no plano de trabalho a 0,75m de altura, espaçados a 0,45m para geração dos valores de iluminância no nível das mesas (Figura 3).

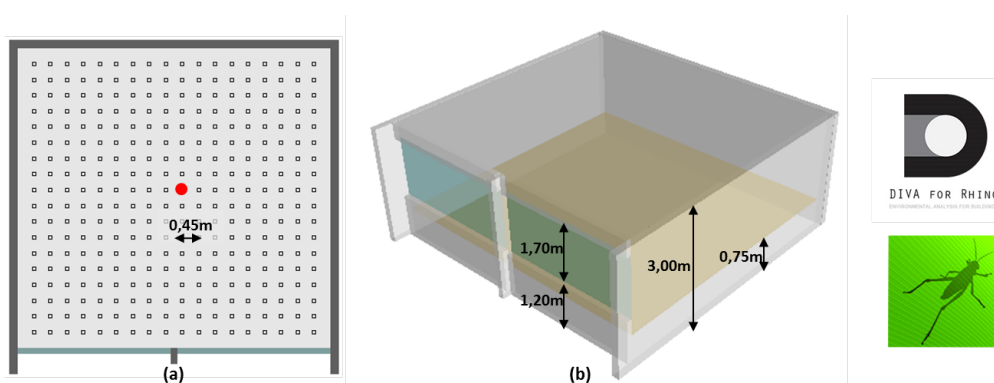


Figura 3. (a) Plano de trabalho e (b) Distribuição dos pontos no plano de trabalho. Desenvolvido pelos autores (2018).

### Indicadores de desempenho

Para avaliação do desempenho luminoso foram adotados como critérios recomendados pela IES LM-83-12 (Illuminating Engineering Society, 2013), sendo: a autonomia espacial da luz natural (sDA – Spatial Daylight Autonomy) que consiste na fração de horas ocupadas em um período de um ano em que um nível de iluminância mínimo exigido de 300lux é mantido em 50% do ambiente com suficiência da fonte natural de iluminação (sDA<sub>300/50%</sub>) e a iluminância natural excessiva (eUDI – Excessive Useful Daylight Illuminance), parâmetro que classifica a frequência anual de iluminâncias excedentes sobre o plano de trabalho (NABIL e MARDALJEVIC, 2005; MARDALJEVIC et al., 2012).

A definição da zona de iluminação autônoma e excessiva da sala é investigada através das iluminâncias mínima e máxima de 300lux e 3000lux, respectivamente. Através desses, foram registradas as frequências de ocorrência anual em que as iluminâncias atingem os níveis de referência entre a faixa mínima e máxima. Ainda, investiga-se o comportamento da iluminação natural na profundidade da sala nos períodos de verão e inverno nos pontos destacados na Figura 4, adotando o horário em que níveis de iluminância são mais significativos. Nestas condições, os valores estimam o impacto da adoção de dispositivos de proteção solar no plano das mesas (carteiras).

## Resultados

### Autonomia da luz natural e Iluminância excessiva

Os diagramas de cores falsas representam as iluminâncias na altura do plano de trabalho com autonomia acima de 300lux em pelo menos 50% do ano. Quanto à autonomia espacial da luz natural (sDA<sub>300lux</sub>), observa-se que todos os modelos apresentaram desempenho enquadrados no percentual exigido pela IES LM-83-12. Entanto, a situação atual (B) se contrapõe dos demais, uma vez que atingiu área autônoma em todo o ambiente, com alto nível lumínico e tendência a fontes luz excessivas. Esse fato culmina no aumento da temperatura interna (ganhos térmicos) e na ocorrência de desconforto visual por ofuscamento.

Com a inserção dos dispositivos de proteção horizontal, observa-se uma redução de mais de 20% da autonomia espacial, tendo destaque para a prateleira de luz interna e externa (PM), com percentual de 82%. Esse resultado interfere nas

iluminâncias das zonas mais afastadas das aberturas, sobretudo no modelo de prateleira interna (PI) que concentra toda área iluminada na porção mais próxima da abertura. Já os modelos com proteção externa (M) e (PM), as iluminâncias em mais próximos da janela foram bloqueados, concentrando a autonomia na porção central da sala. A vantagem de tal recurso é a possível redução das cargas térmicas nessas áreas e o prolongamento da iluminação ao longo da sala (Figura 4).

Com a adição de brises, na condição horizontal e inclinada, destaca-se o modelo com proteção inclinada a 15°, com aproximadamente 84% da autonomia. A medida que aumenta a inclinação do dispositivo, observa-se uma supressão do percentual de iluminação a 300lux, como o caso do brise à 30°, que atingiu área iluminada autônoma de 67,8% concentrados em 2/3 da sala, com proximidades da abertura. Já o brise horizontal (B0) apresentou menor desempenho entre os demais e declinou em quase 10% se comparado ao de máxima inclinação, bloqueando a incidência da iluminação na porção próxima a abertura e nas áreas mais afastadas.

Com a combinação das proteções prateleira e brise (PBi), a autonomia da luz natural alcançou percentuais próximos de 80%, sobressaindo o modelo com brise de inclinação intermediária (PB15). O uso do brise à 0° registrou o menor percentual de autonomia espacial com a distribuição da iluminação limitada à área central da sala, sendo este comportamento alterado com a rotação do dispositivo. Nestes termos, observou-se que a variável inclinação é inversalmente proporcional ao desempenho da área iluminando. Deste modo, quanto maior o ângulo de inclinação, menos iluminada será a porção oposta a abertura. Ainda, a adoção de sistemas de proteção inclinados a 15° apresentou melhor desempenho com brises ou quando combinados com prateleira de luz, registrando comportamentos autônomos similares.

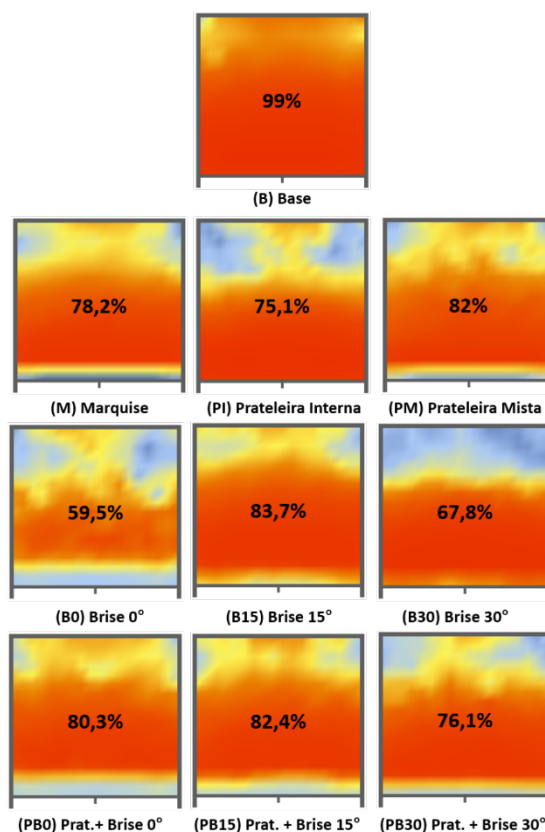


Figura 4. Diagrama de cores falsas da autonomia espacial ( $sDA_{300lux}$ ). Desenvolvido pelos autores (2018).

Quanto às iluminâncias excessivas ( $eUDI_{<3000lux}$ ), as zonas próximas às aberturas alcançaram os maiores níveis de iluminação, conforme ilustra a Figura 5. Dentre os modelos simulados, quatro ambientes registraram maior ocorrência de iluminâncias excessiva, acima de 3000lux, sendo elas: a situação atual, representada pelo modelo Base (B), o modelo com prateleira interna (PI) e com brises inclinados (B15 e B30). Com comportamento de maior impacto, o ambiente que representa a condição atual (B) atingiu percentuais excessivos em quase 1/3 da sala. Além desse, a prateleira interna e os brises a 30°, com 20,1% e 21,1%, respectivamente, não promoveram o bloqueio das fontes de luz excessiva, sendo mais propensos à sobrecarga térmica e ofuscamento.

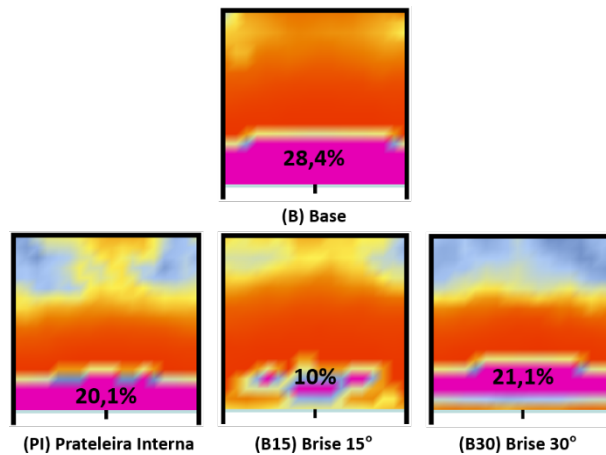


Figura 5. Diagrama de cores falsas da iluminância excessiva (eUDI<sub>3000lux</sub>). Desenvolvido pelos autores (2018).

Embora tenham alcançada autonomia na faixa dos 80% (Figura 5), o ambiente com brises inclinado a 15° (B15) concentrou em 10% os percentuais de iluminância excessiva. Ao contrário desse, os modelos com prateleira interna e externa (PM) e combinada com brise (PBi) atingiram iluminância autônoma em mais de 2/3 de área do plano de trabalho e suprimiram a incidência de radiação solar direta, registrando menos de 5% de área com iluminâncias acima 3000lux.

#### Iluminâncias no verão e no inverno

Para análise das iluminâncias ao longo da sala nos períodos de inverno e inverno, optou-se pelo registro da frequência entre 300 e 3000lux às 9h e às 15h, sendo essas referências horárias, uma vez que registraram níveis mais significativos nos solstícios (21/06 e 21/12). Próximo às aberturas, os níveis de iluminação nos solstícios foram superiores, especialmente nos modelos sem proteção (B) e com prateleira interna (PI).

Com base nos pontos localizados na porção central da sala (Figura 3a), as iluminâncias no inverno atingiram mínimas de 300lux e máximas de 12000lux (Figura 6). No turno da manhã, às 9h, percebe-se um aumento dos percentuais nos modelos com brises inclinados (B15 e B30) e prateleira interna (PI), quando comparados ao modelo sem proteção e de maior impacto (B). A condição atual da sala, sem proteção solar, registrou maiores ocorrências de iluminâncias acima de 3000lux, ultrapassando a faixa útil.

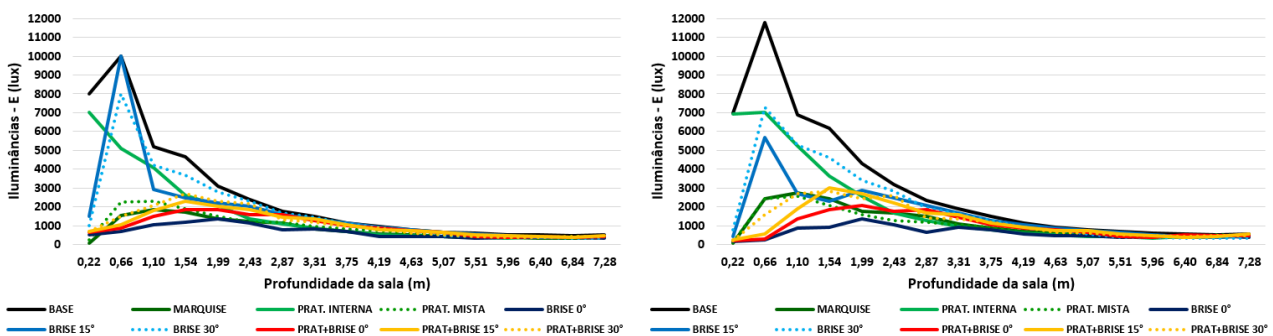


Figura 6. Iluminâncias (E) às 9h e às 15h no período de inverno. Desenvolvido pelos autores (2018).

Diferente deste, o turno da tarde, às 15h, apresentou comportamento mais heterogêneo com redução gradativa a medida que se afasta da abertura. Comportamentos díspares ocorreram com a combinação entre prateleira e brise (PBi), com iluminância acima de 1000lux a partir da distância de 1,00m da janela. Deste modo, no período de inverno, as proteções promoveram uma supressão significativa das iluminâncias nos períodos das 9h e 15h.

No período de verão, as mesmas proteções de destaque no inverno (B e PI) foram evidenciadas com iluminâncias máximas de 16.500lux às 9h e 20.000lux às 15h (Figura 7). Tais valores foram registrados com predominância de altos

níveis de iluminância próximos à abertura. Diferente do período de inverno, a faixa de iluminância no verão oscilou de 1.500lux a 7.500lux em quase toda extensão da sala, sendo menos homogênea que as registradas na Figura 6.

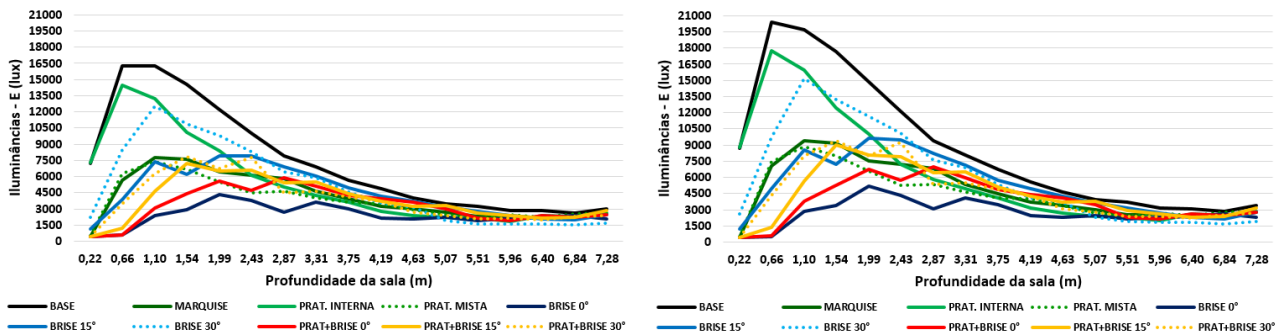


Figura 7. Iluminâncias (E) às 9h e 15h no período de verão. Desenvolvido pelos autores (2018).

Os modelos com dispositivos horizontais (Marquise e Prateleira Mista) apresentaram comportamento luminoso similar com distribuição de iluminâncias variando de com mínima de 400lux a 500 lux. Já os modelos com dispositivos inclinados apresentaram comportamento semelhante aos modelos destacados no inverno. Esses horários registraram os maiores valores de iluminância nos solstícios. Assim sendo, observa-se que as proteções horizontais proporcionaram distribuição mais uniformes em ambos os solstícios. O verão, no entanto, apresentou maior amplitude e contraste, condição adversa a um ambiente de estudo.

## Discussão e Conclusão

O Brasil, em especial o Nordeste, dispõe de luz natural muito abundante que se bem aproveitada é uma excelente alternativa para a redução do consumo de energia elétrica, em especial nas edificações escolares, onde observa-se até hoje poucas iniciativas nesse sentido. Soluções simples e de baixo custo podem ser utilizados para se obter um melhor aproveitamento da luz natural nessas edificações e conseqüentemente uma queda no consumo de energia elétrica. Neste trabalho realizou-se uma investigação sobre a influência das aberturas com diferentes proteções solares estáticas no desempenho lumínico em sala de aula localizada na cidade de Pombal/Paraíba, região do semiárido brasileiro. Através de métricas dinâmicas, foram avaliadas zonas de autonomia da luz natural ( $DA_{>300lux}$ ), de iluminância útil excessiva ( $eUDI_{>3000lux}$ ) e as frequência anual entre as faixas de iluminâncias mínima e máxima referentes aos solstícios de inverno e verão às 9h e 15h. Verificou-se que os níveis atuais de iluminância estão em concordância com a recomendação pela Illuminating Engineering Society (IES LM-83-12, 2013). No entanto, em quase todo o período de ocupação da sala de aula, iluminâncias acima de 3000lux foram observadas nas porções mais próximas as aberturas. Com a inserção dos elementos de proteção solar, ocorreu uma alteração dos níveis luminosos, com destaque para os dispositivos de inclinação de 15°, os quais obtiveram melhores registros de iluminância autônoma. Ao contrário desses, a condição atual sem proteção, a adoção de prateleira interna e de brise à 30° registraram maiores níveis de iluminâncias excessivas, com média anual de 20%. Este estudo comprovou a influência das aberturas com dispositivos de inclinação entre 0° e 15° ao promover o redirecionamento da iluminação ao longo da sala. Tais modelos atingiram áreas autônomas de iluminância e maior uniformidade nos períodos de inverno e verão. No entanto, ângulos acima de 15° acarretaram o aumento da iluminância excessiva da sala de aula, comprovado com os resultados registrados nos modelos com proteção à 30°. Destaca-se também, a versatilidade e importância do uso de programas de simulação durante o processo projetual, onde é possível avaliar o desempenho daquelas edificações variando seus elementos contrutivos, para então definir o melhor a ser usado, buscando otimizar o conforto dentro dos ambientes.

## Referências

- CARVALHO, J. P. V. (2014) Simulação de desempenho luminoso para salas de aula em Natal-RN. Dissertação – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- DIAS, A. F. A.; GOMES V. A.; CABÚS, R. C. (2009) Componente de Controle de luz natural em salas de aula e seu desempenho conforme a orientação solar do edifício. In: X ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO; VI ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Natal, 2009. Anais... Natal: ENCAC - ENLACAC 2009.
- DORIGO, A. L. (2007) Condições de luz natural em ambientes escolares – Estudo do Projeto Padrão 023 da rede pública de ensino do estado do Paraná. Curitiba, 2007. 114p. Dissertação – Universidade Federal Tecnológica do Paraná.

- IESNA, IES LM-83-12 (2012). IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). New York, NY, USA, IESNA Lighting Measurement.
- KOWALTOWSKI, D. C. C. K. (2011) Arquitetura escolar e o projeto do ambiente de ensino. São Paulo, 2011.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. (1997) Eficiência Energética na Arquitetura. São Paulo: PW Editores, 1997.
- LIMA, D. C. D.; SILVEIRA, A. L. R. C. (2013) Análise da iluminação natural em salas de aula da universidade federal do Piauí. In: XII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO; VIII ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Brasília, 2013.
- MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. C. (2005) Uso de Instrumentos Computacionais para Análise do Desempenho Térmico e Energético de Edificações no Brasil. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.5, n.4, p. 47-68, outubro/dez. 2005.
- MERESI, A. (2016) Evaluating daylight performance of light shelves combined with external blinds in south-facing classrooms in Athens, Greece. Energy and Buildings, v. 116, p.190-205, 2016.
- Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (2018). Arquivos climáticos. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>. Acesso em: Julho de 2018.
- NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. (2005) Useful daylight illuminance: a new paradigm to access daylight in buildings. Lighting Research & Technology, v. 37, n. 1, 2005.
- REINHART, C.F. (2010) Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design. Harvard Design School, 2010.
- Robert McNeel and Associates (2018). Rhinoceros. Disponível em: <<http://www.rhino3d.com>> Acesso em: Julho de 2018.
- SANTOS, L. S.; SOUZA, A. D. S.; ALVAREZ, C. E.; AMORM, C. N. D. O. (2010) Potencial de Uso da Luz Natural em Edifícios Escolares para a situação de Vitória-ES. In: XII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2010, Canela. Anais..., Canela: ENTAC, 2010.
- SOLEMA LLC, DIVA-for-Rhino software version 4.0 (2018). Disponível em: <<http://www.diva4rhino.com>> Acesso em: Julho de 2018.
- WARRIER, G.A.; RAPHAEL, B. (2017) Performance evaluation of light shelves. Energy and Buildings, v. 140, p.19-27, 2017.

## **Análise da influência da geometria do edifício na distribuição de coeficientes de pressão em um edifício isolado: simulação CFD**

Analysis of the influence of geometry building on pressure coefficient distribution on an isolated building: CFD simulation

**Marieli Azoia Lukiantchuki**

Universidade Estadual de Maringá

Avenida Colombo, n.5790 – Jardim Universitário. CEP: 87020-900, Maringá - PR

[malukiantchuki2@uem.br](mailto:malukiantchuki2@uem.br)

**Alessandra R. Prata Shimomura**

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo

Rua do Lago, 876 – Butantã. CEP 05508-080, São Paulo, SP

[arprata@usp.br](mailto:arprata@usp.br)

**Fernando Marques da Silva**

Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Lneec

Avenida do Brasil, 101. CEP: 1700-066. Lisboa, Portugal

[fms@lnec.pt](mailto:fms@lnec.pt)

**Rosana Maria Caram**

Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo

Avenida Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro. CEP: 13566-590. São Carlos - SP

[rcaram@sc.usp.br](mailto:rcaram@sc.usp.br)

Manuscript Code: 031

Date of Acceptance/Reception:

## Resumo

O conhecimento da distribuição de pressão nas paredes do edifício é importante para a avaliação de cargas de vento e ventilação natural. As distribuições de pressão induzidas pelo vento são influenciadas por uma ampla gama de fatores, incluindo condições de fluxo de aproximação, ambiente urbano e geometria do edifício. A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) pode ser uma ferramenta valiosa para determinar os coeficientes médios da pressão do vento nas fachadas dos edifícios. No entanto, embora muitos estudos de CFD sobre a pressão média do vento em edifícios tenham sido realizados no passado, a grande maioria desses estudos concentrou-se em geometrias simples de edifícios, sem detalhes de volume, como sheds na cobertura. A falta de dados para geometrias complexas leva os projetistas a usar bancos de dados existentes para geometrias simples, o que não é compatível com a distribuição de pressão na superfície de edifícios com geometrias complexas. Além disso, muitas vezes dados de  $C_p$  (coeficiente de pressão) no ponto médio da fachada são adotados como dados de entrada do software de desempenho térmico. No entanto, os detalhes das geometrias podem influenciar drasticamente o padrão de fluxo e a distribuição geral de pressão na fachada. Neste estudo, investigou-se a influência da geometria e da direção do vento na distribuição do  $C_p$  em torno de edifícios isolados. Dois modelos são analisados: o modelo um possui geometria simples (paralelepípedo) e no modelo dois foram incluídos sheds na cobertura (geometria complexa). Os sheds são aberturas no telhado que funcionam como captadores e extratores de ar. Nota-se que os sheds ocasionam mudanças muito significativas na distribuição da pressão do vento, porque eles introduzem múltiplas áreas de separação de fluxo e recirculação através da fachada.

Palavras chaves: Simulação CFD; Ventilação natural; Coeficientes de pressão; Edifício paralelepípedo; Edifícios com coberturas em sheds

## Abstract in English

Knowledge of the pressure distribution on building walls is important for the evaluation of wind loads and natural ventilation. Wind-induced pressure distributions are influenced by a wide range of factors including approach-flow conditions, urban surroundings and building geometry. Computational Fluid Dynamics (CFD) can be a valuable tool for determining mean wind pressure coefficients on building facades. However, while many CFD studies of mean wind pressure on buildings have been performed in the past, the vast majority of these studies focused on simple building geometries without volume details such as shed roof. The lack of data for complex geometries leads designers to use existing databases for simple geometries, which is not compatible with the pressure distribution on the surface of buildings with complex geometries. In addition, often pressure coefficient data at the midpoint of the façade is adopted as input data of thermal performance software. Geometries details however can drastically influence the flow pattern and the overall pressure distribution on the facade. In this study, the influence of geometry building and wind direction on pressure coefficient distribution around isolated building were investigated. The aim of this study is to analyze the difference of the  $C_p$ s distribution on surfaces of a isolated building. Two models are analyzed: the model one is simple geometry (parallelepiped) and in model two were included sheds on the roof (complex geometry). The sheds are openings on the roof which functions as air collectors and extractors. All analysed models have the same dimensions. It is shown that shed roof building can lead to very strong changes in wind pressure distribution, because they introduce multiple areas of flow separation and recirculation across the facade.

Keywords: CFD simulation; natural ventilation; pressure coefficients; parallelepiped building; sheds roof building



## Introdução e estado da arte do problema

O conhecimento da distribuição de pressão nas paredes do edifício é essencial para avaliar a ventilação natural induzida pelo vento e para avaliar as cargas de vento nas paredes e componentes dos edifícios (Cóstola, Blocken & Hensen, 2009; Montazeri e Azizian, 2008;; Karava, Stathopoulos e Athientis, 2004). Os coeficientes de pressão ( $C_p$ ) são um dos principais parâmetros no estudo da ventilação natural pela ação dos ventos, sendo considerado um dos parâmetros com maior influência no desempenho térmico do edifício. É um importante dado de entrada para vários programas de simulação de desempenho térmico do edifício e de cálculos de fluxo de ar, como Energyplus, Aiolos, Contam e EDSL-TAS (Wit, 2001; Orme, 1999; Crawley et al., 2008). O coeficiente de pressão ( $C_p$ ) é definido como o quociente adimensional entre a pressão dinâmica medida em um ponto  $x$  na fachada do prédio ( $P_x$ ) e a pressão dinâmica do fluxo de ar não perturbado ( $P_d$ ), representado pela equação 1 (Awbi 1998, Etheridge e Sandberg, 1996). A pressão dinâmica de fluxo não perturbada ( $P_d$ ) é a força por unidade de área exercida pelo vento em um plano ortogonal à direção do fluxo (equação 2).

$$C_p = \frac{P_x}{P_d} \quad (\text{Equação 1})$$

$$P_d = \frac{\rho V_{ref}^2}{2} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$P_d$ : Pressão dinâmica do fluido (Pa)

$V_{ref}$ : velocidade de referência medida na mesma altura da cobertura do edifício (m/s)

$\rho$ : massa específica do ar ( $\text{Kg/m}^3$ )

A distribuição de pressão nas paredes do edifício é influenciada por uma ampla gama de fatores, incluindo condições de fluxo de aproximação (Stathopoulos, 1997), ambiente urbano (Kim, Yoshida & Tamura, 2012), geometria da edificação (Uematsu & Isyumov, 1999) e direção do vento (Levitan, Mehta, Vann & Holmes, 1991). Em particular, a construção com geometria complexa pode afetar as distribuições de pressão de superfície média e máxima nas paredes e telhados dos edifícios (Stathopoulos & Zhu, 1988).

Não há muitos dados de  $C_p$ s disponíveis para *designers*, especialmente de geometrias complexas. Os bancos de dados existentes fornecem um número limitado de dados de  $C_p$ , e estes são para edifícios com geometrias simplificadas, como cubos, cilindros e paralelepípedos de diferentes proporções (Cóstola et al., 2009; Allard, 1998; Santamouris & Wouters, 2006; Bittencourt & Cândido, 2008). Uma prática comum na ausência desses dados é o uso de valores de  $C_p$  obtidos para outros edifícios de formatos semelhantes, o que ocasiona erros na análise do fluxo de ar. Além disso, o uso do  $C_p$  médio da fachada aumenta a probabilidade de erros no cálculo do fluxo de ar, apresentando diferenças de até 40% (Cóstola et al., 2010).

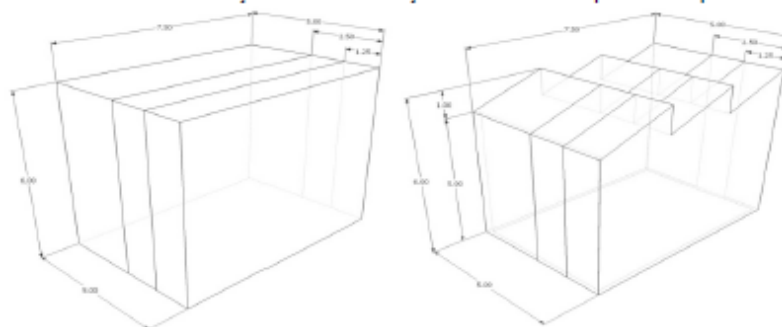
O CFD foi usado em muitas ocasiões no passado para determinar as distribuições de pressão induzidas pelo vento nas fachadas dos edifícios. Cóstola e Alucci (2011) afirmam que o uso de CFD para definir  $C_p$  é viável e constitui uma importante alternativa aos túneis de vento. No entanto, diferentes configurações de simulação levam a desvios consideráveis, tanto em termos absolutos (até  $\pm 0,5\%$ ) quanto em termos relativos (até 50%). Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da geometria e da direção do vento na distribuição do  $C_p$  em torno de edifícios isolados através de simulações CFD para obter  $C_p$ s. É importante enfatizar que o presente artigo não propõe fornecer resultados realistas de  $C_p$ , que dependem da validação das simulações através da comparação com experimentos de pequena escala e edifícios reais.

## Metodologia

### Descrição dos modelos avaliados

Dois modelos foram avaliados: o modelo um apresenta uma geometria simples (paralelepípedo) com dimensões de 5m x 7,5m x 6m ( $L \times C \times H$ ). O modelo dois possui as mesmas dimensões que o modelo um. No entanto, apresenta a cobertura composta de três *sheds* de geometria ortogonal (dente-de-serra), com inclinação de 22° e distanciados um do outro em 2,50m (geometria complexa). Os modelos avaliados são totalmente vedados, ou seja, não apresentam aberturas. Coeficientes de pressão ( $C_p$ ) foram medidos na superfície do edifício ao longo de três linhas verticais: a linha central foi localizada no eixo central, a uma distância de 2,50m da lateral do edifício. As linhas de borda foram localizadas a 1,25m da lateral do edifício (Figura 1). Neste artigo, vamos nos referir a essas linhas verticais como "linha central" e "linhas de borda", respectivamente. Com relação aos ângulos de incidência dos ventos externos, os

Figura 1. Modelos avaliados com indicação dos eixos de medição dos coeficientes de pressão na superfície dos edifícios

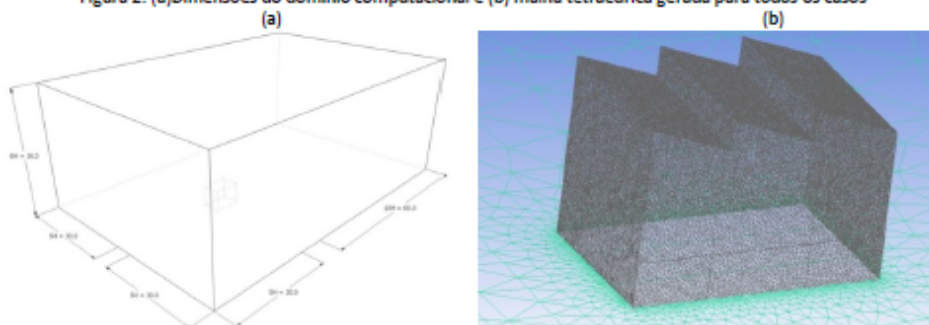


### Simulação por Dinâmica dos Fluidos Computacional

Para as simulações, utilizou-se o *software* CFX 12.0, baseado na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), sendo adequado ao estudo da ventilação natural nos edifícios e amplamente utilizado nas pesquisas de análise de fluidos nas áreas de engenharia e arquitetura, apresentando coerência dos resultados com os fenômenos físicos.

O modelo tridimensional do edifício e do domínio foi realizado com o *software* AutoCAD. Optou-se pelo domínio retangular por possibilitar um número menor de elementos na malha e, conseqüentemente, a redução do tempo de processamento das simulações. As dimensões seguiram as recomendações de Harries (2005), Franke et al. (2007) e Tominaga et al. (2008): distâncias a barlavento e nas laterais = 5H (25 m); altura = 6H (30 m); e, distância a sotavento = 15H (75 m); sendo H = 5 m, que corresponde à altura do modelo simulado (Figura 2.a). A área de obstrução do edifício no domínio atendeu à sugestão de Cost (2004), que recomenda um valor abaixo de 3%. Assim, evita-se o efeito de blocagem, impedindo que as fronteiras do domínio influenciem no escoamento. Utilizou-se uma malha estruturada tetraédrica, cujos parâmetros globais foram: (a) *maximum element size* 16; (b) *natural size* 4; e (c) *cells in gap* 8. A malha foi refinada nas superfícies do edifício em um valor de 0,10m, a fim de melhorar a visualização do fluxo de ar no espaço interno e no entorno imediato ao edifício (Figura 2.b). A combinação desses parâmetros determina a quantidade de elementos da malha e, assim, o tempo de processamento das simulações.

Figura 2. (a) Dimensões do domínio computacional e (b) malha tetraédrica gerada para todos os casos



As condições do domínio foram: (a) entrada como *Inlet* e a saída como *Outlet*; (b) as laterais e o teto como *Wall free slip* (sem atrito), pois não impõe resistência às partes do domínio onde não são realizadas análises importantes; e (c) o piso e as superfícies do edifício como *Wall no slip* (com atrito). A velocidade da entrada foi de ( $U = 2,5 \text{ m/s}$ ), e como entorno um ambiente suburbano com valor de  $\alpha = 0,25$ , adotado através de BRE (1987), usando a equação 3 a seguir.

$$\frac{U}{U_{ref}} = \left( \frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:

U: velocidade média do vento em certa altura h (m/s);

U<sub>ref</sub>: velocidade do vento medida na altura de referência (m/s);

h: altura da edificação que se deseja avaliar a velocidade do vento (m);

h<sub>ref</sub>: altura de referência da velocidade do vento (10 m);

$\alpha$ : expoente de lei de potência da camada limite atmosférica (entorno).

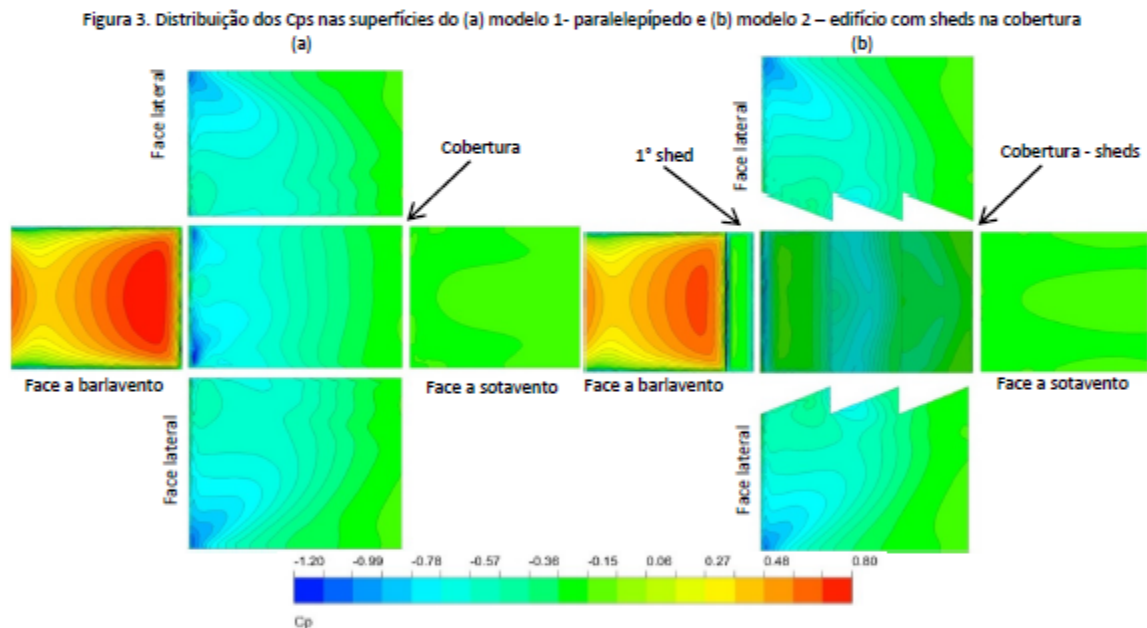
A simulação decorreu em regime permanente, na condição isotérmica a 25 °C (ação dos ventos). Segundo Brandão (2009), simulações apenas do campo de ventos, normalmente, são realizadas em regime permanente. Isso ocorre porque as condições de contorno são constantes e a relação entre o campo de velocidade e a velocidade de entrada do ar no modelo se mantém constante para velocidades médias ou altas. De acordo com Cóstola (2006), a simulação

em regime transiente só se justifica para o uso do modelo LES, o que não é o caso do presente artigo. O modelo de turbulência utilizado foi o K-Epsilon, que é comum e bem estabelecido em diversas pesquisas de dinâmica dos fluidos e ventilação natural (Calautit; Hughes, 2014). Além disso, usa-se esse modelo por oferecer a melhor relação entre custo (tempo de processamento) e benefício (precisão). Neste modelo os efeitos da turbulência no escoamento médio são descritos por meio de duas equações: uma para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e outra para a taxa de dissipação da turbulência ( $\epsilon$ ). A modelagem da turbulência, ainda, é um tema controverso e o presente artigo não tem por objetivo abordá-lo. É altamente recomendável que os futuros trabalhos abordem esse tema de maneira detalhada, buscando a melhor relação entre qualidade dos resultados obtidos e capacidade computacional necessária. O nível de convergência foi estabelecido quando todos os níveis residuais alcançaram um valor máximo de  $10^{-4}$ . Os números de iterações mínimos e máximos adotados foram de 600 e 6.000, respectivamente. Esses parâmetros foram baseados em pesquisas sobre ventilação natural, utilizando o CFX (Brandão, 2009; Cóstola, 2006; Leite, 2008; Prata, 2005).

## Resultados e Discussão

### Impacto da geometria nos valores de $C_p$ na superfície de edifícios vedados

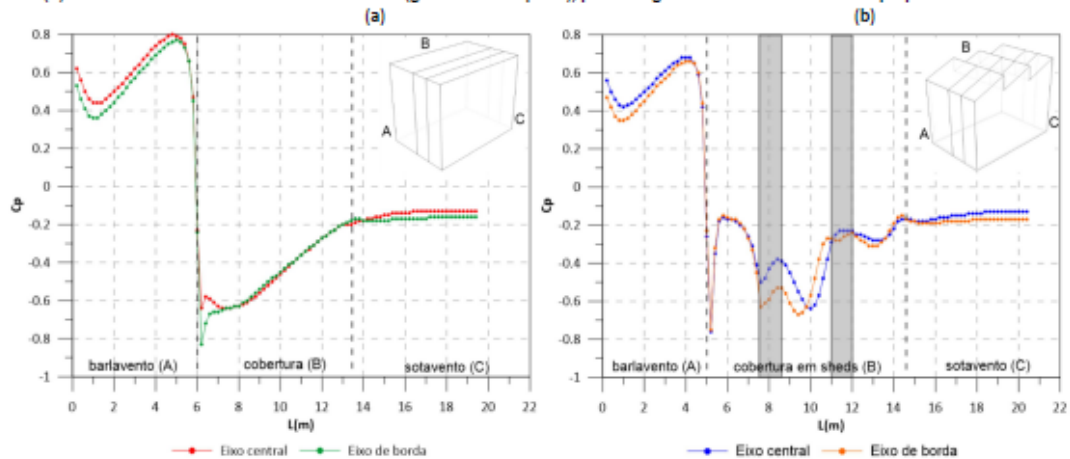
O impacto da geometria dos edifícios nos valores de  $C_p$  é investigado através da comparação de um edifício de geometria simples com um edifício de geometria complexa, com *sheds* na cobertura. Esta seção apresenta os resultados para a incidência do vento perpendicular a fachada ( $0^\circ$ ). A Figura 3 apresenta a distribuição dos  $C_p$  na superfície dos dois modelos avaliados. Nota-se claramente uma diferença na distribuição dos  $C_p$  em função do acréscimo de *sheds* na cobertura do modelo. Na face a barlavento, embora o padrão de distribuição seja similar, os valores são diferentes, principalmente no ponto médio da fachada. A divergência entre os modelos é maior na superfície da cobertura, tanto em valores de  $C_p$  como no padrão da distribuição das pressões ao longo da superfície.



Essa análise fica mais clara com o gráfico da Figura 4, que compara os resultados da simulação CFD dos valores de  $C_p$  ao longo dos eixos de medição verticais (eixos central e de borda) para o edifício paralelepípedo e o edifício com *sheds* na cobertura. O gráfico confirma a complexidade da distribuição dos  $C_p$  ao longo da cobertura do edifício com *sheds* e o impacto da geometria dos modelos na distribuição de pressão na superfície dos edifícios.

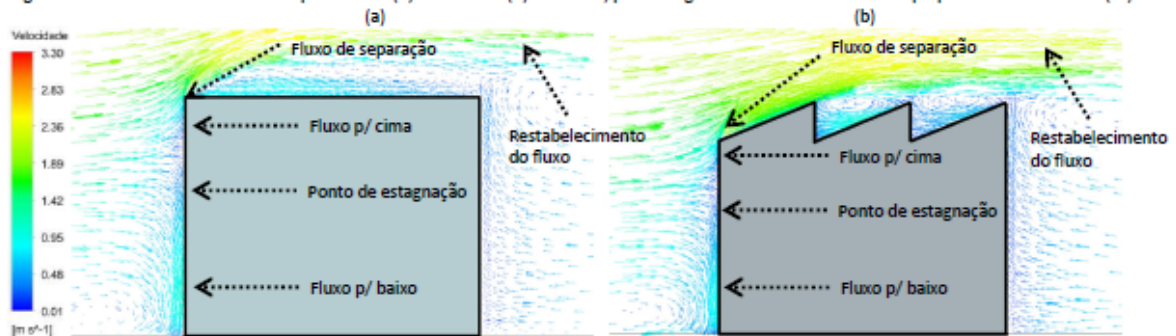
Na face a barlavento, a meia altura da fachada, tanto para o eixo central como para os eixos laterais, os valores de  $C_p$  se convergem, apresentando dados similares para os dois modelos analisados. No eixo central, os valores no meio da fachada são idênticos e para os eixos laterais, notam-se pequenas diferenças. Nesse caso, em simulações de desempenho térmico que é comum o uso dos valores de  $C_p$  pelo ponto médio na fachada, essa mudança na geometria não acarretaria diferenças significativas. No entanto, ao longo do eixo da fachada, nota-se uma divergência, em função das diferentes geometrias. A presença dos *sheds* na cobertura produz um perfil de  $C_p$  diferente ao longo da fachada, principalmente na região inferior e superior (próximo ao *sheds*), registrando zonas de pressão mais baixas, causadas pela multiplicidade de áreas de separação de fluxo e recirculações induzidas por esses elementos na cobertura. Essa divergência, que se mostra significativa no desempenho do fluxo de ar interno, não é capturada pelo  $C_p$  médio da fachada, ou seja, o uso desse valor como dado de entrada dos softwares de desempenho térmico pode ocasionar resultados equivocados.

Figura 4. Distribuição dos Cps nas superfícies do edifício no eixo central e no eixo de borda para (a) modelo 1- geometria simples (paralelepípedo) e (b) modelo 2 – edifício com sheds na cobertura (geometria complexa), para o ângulo de incidência dos ventos perpendicular ao edifício (0°)



Essa diferença ocorre principalmente devido à inclinação dos *sheds*, que possibilita o impacto direto do fluxo sobre a cobertura e, posteriormente, uma grande sombra de vento. Já no caso do paralelepípedo, a sua geometria simples forma uma única sombra de vento na cobertura, originária do fluxo de ar que incide na face a barlavento, gerando, Cps negativos ao longo de toda a superfície da cobertura. A região mais próxima da face a barlavento possui valores mais negativos, devido a maior velocidade do vento. À medida que vai se afastando dessa região e se aproximando da face a sotavento, os valores ficam menos negativos (Figuras 4 e 5). No modelo 2, os *sheds* na cobertura modifica esse comportamento. O vento externo tangencia totalmente o 1º *shed* com altas velocidades, apresentando Cps menos negativos. A inclinação do *shed* gera uma grande zona de separação junto às superfícies verticais, onde geralmente se localizam as aberturas dos edifícios com *sheds* (no gráfico essas regiões estão em destaque) e, assim, valores de Cps mais negativos, que favoreceriam a sucção do ar pela cobertura. Esse efeito ocasiona nitidamente uma sombra de vento no *shed* posterior (2º *sheds*), com recirculação do ar e, conseqüentemente, valores de Cps mais baixos. O mesmo ocorre no 3º *shed*, mas com velocidades mais baixas e, assim, os valores de Cp são maiores, ou seja, menos negativos (Figuras 4 e 5). Estes resultados mostram que uma mudança na geometria do modelo ocasiona desvios significativos na distribuição dos Cps na superfície dos edifícios. Isso implica que valores precisos de Cps nas geometrias complexas são cruciais para uma avaliação bem sucedida do desempenho do fluxo de ar interno. Na face a sotavento e nas laterais dos edifícios, os dois modelos apresentam comportamento muito similares, não possuindo nenhuma alteração significativa em função da mudança da geometria dos edifícios. O fluxo de ar que incide perpendicularmente na face a barlavento, contorna o edifício com altas velocidades, ocasionando sombras de vento nas duas laterais do edifício e, assim, reduz os valores de Cp nessas regiões. Em função disso, nota-se que esses valores são menores quanto mais próximos da face a barlavento. À medida que se aproxima da face a sotavento, os Cps ficam maiores, ou seja, menos negativos tendendo para valores positivos. Devido à incidência perpendicular dos ventos no edifício, os padrões de distribuição de Cps nessas superfícies são simétricos (Figura 5).

Figura 5. Vetores de velocidade nas superfícies do (a) modelo 1 e (b) modelo 2, para o ângulo de incidência dos ventos perpendicular ao edifício (0°)

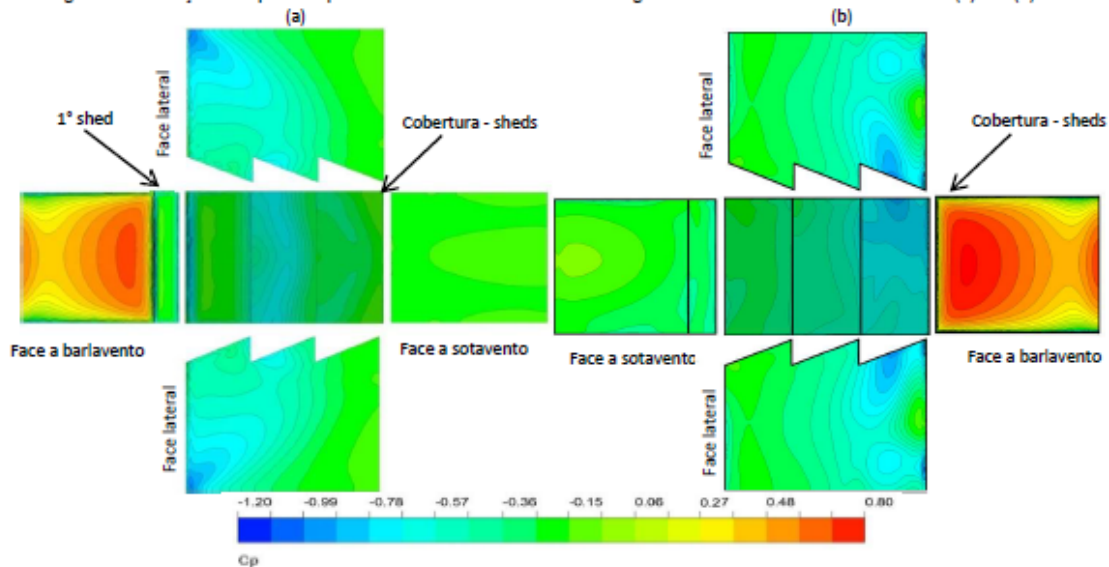


#### Impacto do ângulo de incidência dos ventos nos valores de Cps na superfície no edifício com sheds na cobertura

Edifícios com *sheds* na cobertura podem funcionar como extratores ou como captadores de ar, dependendo da posição das aberturas em relação aos ventos dominantes. No caso dos *sheds* como extratores de ar, os ventos entram pelas aberturas na superfície lateral do edifício e, posteriormente, saem pelas aberturas na cobertura. Para os *sheds*

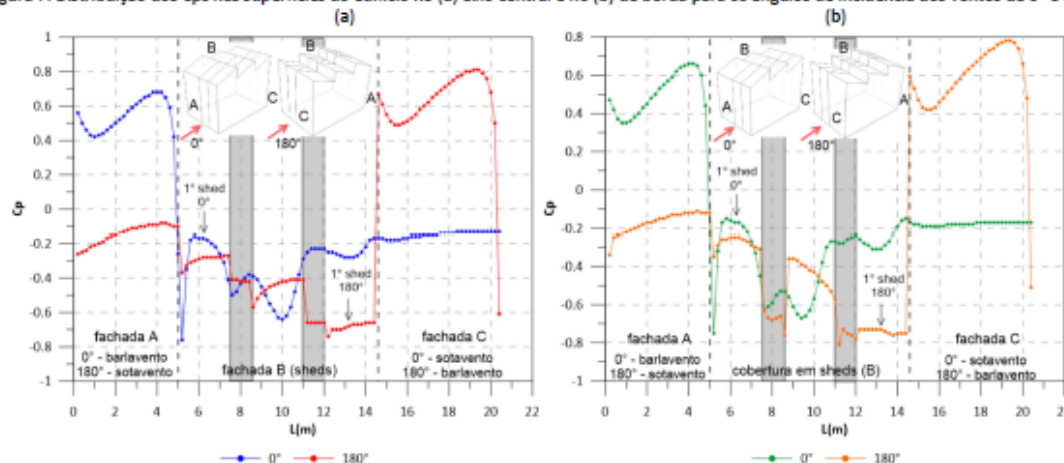
como captadores de ar, os ventos são captados pelas aberturas na cobertura. A seguir, a Figura 6 apresenta a distribuição dos  $C_p$ s na superfície do edifício com *sheds* para os ângulos de incidência dos ventos externos de  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . Nota-se claramente uma diferença na distribuição dos  $C_p$ s em função do ângulo de incidência dos ventos, externos. O padrão de distribuição das pressões nas faces a barlavento apresenta comportamento similar para os dois ângulos de incidência analisados. No entanto, os valores de  $C_p$  no caso de  $180^\circ$  são superiores, tanto para o eixo central como para os eixos de borda. Nas superfícies laterais, ambas as situações apresentam comportamento muito similares: o fluxo de ar que incide perpendicularmente na face a barlavento, contorna o edifício com altas velocidades (na quina do edifício), ocasionando sombras de vento nas duas laterais do edifício e, conseqüentemente, tem-se uma redução dos valores de  $C_p$  nessas regiões. Em função disso, nota-se que esses valores são menores quanto mais próximos da face a barlavento. À medida que se aproxima da face a sotavento, os  $C_p$ s ficam maiores, ou seja menos negativos tendendo para valores positivos. No entanto, há uma diferença em função do ângulo de incidência dos ventos. Na situação de  $180^\circ$  os valores mais negativos de  $C_p$  estão próximos à cobertura, em virtude da inclinação dos *sheds*, o que na situação de  $0^\circ$  são registrados na região inferior do modelo.

Figura 6. Distribuição dos  $C_p$ s nas superfícies do modelo com *sheds* como ângulo de incidência dos ventos externos de (a)  $0^\circ$  e (b)  $180^\circ$



A Figura 7 avalia o impacto do ângulo de incidência dos ventos externos no edifício com geometria complexa, nos valores de  $C_p$ s, para situação dos *sheds* como extratores (ângulo de  $0^\circ$ ) e captadores de ar (ângulo de  $180^\circ$ ).

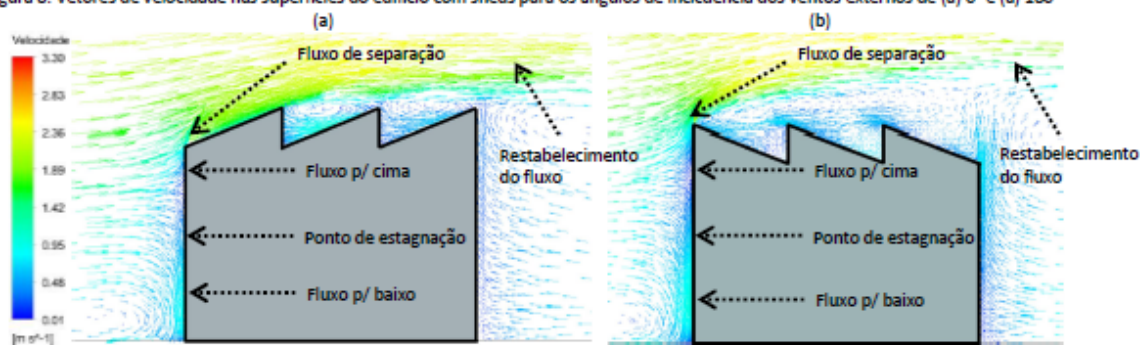
Figura 7. Distribuição dos  $C_p$ s nas superfícies do edifício no (a) eixo central e no (b) de borda para os ângulos de incidência dos ventos de  $0^\circ$  e  $180^\circ$



Quando os ventos incidem no modelo a  $180^\circ$ , a fachada a barlavento registra valores superiores de  $C_p$ , em virtude da maior altura dessa fachada em relação ao caso de  $0^\circ$ , que tem 1,0m a menos devido à inclusão dos *sheds* na cobertura. A fachada posterior a sotavento, para as duas situações analisadas, registram valores de  $C_p$  negativos e muito similares, devido à sombra de vento e as regiões de recirculação do ar. Isso é notado pela Figura 8 que

representa os vetores de velocidade contornando as superfícies do edifício com *sheds* para  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . Já a distribuição dos coeficientes de pressão na cobertura com *sheds* tem uma diferença significativa em relação à incidência dos ventos dominantes. Enquanto para o ângulo de  $0^\circ$  o primeiro dispositivo funciona como acelerador da velocidade obtendo valores de  $C_p$ s menos negativos, em função das altas velocidades do ar, nota-se para a situação de  $180^\circ$  uma grande sombra de vento, possibilitando valores de  $C_p$  significativamente mais baixos, com valores mais negativos, tanto para o eixo central quanto para o eixo de borda. Na situação de  $180^\circ$ , nota-se uma grande diferença na transição entre a fachada a barlavento e a cobertura, sendo que os valores de  $C_p$  registrados na parte superior da fachada a barlavento, próximo ao *shed*, foram da ordem de  $C_p = +0.64$ , e o primeiro ponto registrado no *shed* foi de  $C_p = -0.75$ . Isso é ocasionado pelas altas velocidades do fluxo de ar que incide na face a barlavento, formando uma grande sombra de vento da cobertura com intensa zona de separação, provocando valores de  $C_p$  mais baixos (maior velocidade – menor pressão) (Figuras 7 e 8).

Figura 8. Vetores de velocidade nas superfícies do edifício com *sheds* para os ângulos de incidência dos ventos externos de (a)  $0^\circ$  e (a)  $180^\circ$



Já nos *sheds* posteriores, esse efeito é menos intenso, devido à redução da velocidade dos ventos. Os  $C_p$ s continuam negativos devido à recirculação e a sombra de vento sobre a cobertura (Figuras 7 e 8). No entanto, à medida que se distancia da face a barlavento, os valores de  $C_p$  nos *sheds* são menos negativos. Isso também foi registrado para o ângulo de  $0^\circ$ . No entanto, nota-se uma grande diferença nos  $C_p$ s nas superfícies verticais da cobertura (região onde se localizariam as aberturas dos *sheds*), em destaque no gráfico (Figura 7). Na superfície vertical referente ao *shed* do meio, para a situação de  $180^\circ$  a sombra de vento gera valores significativamente menores que no caso a  $0^\circ$  (da ordem de  $C_p = -0,7$  e  $C_p = -0,3$  para  $180^\circ$  e  $0^\circ$ , respectivamente). Já na superior vertical posterior os valores são parecidos para os dois ângulos analisados, devido à redução do efeito da sombra de vento da cobertura. Ressalta-se que no caso da existência de aberturas nessas superfícies verticais, os valores de  $C_p$  encontrados indicam captação do ar apenas pelo dispositivo frontal a barlavento. O fluxo de ar incidente na cobertura com altas velocidades gera uma zona de separação com a formação de uma sombra de vento que ocasiona a queda dos valores de  $C_p$  nas regiões verticais dos *sheds* localizados na região posterior (valores de  $C_p$  negativos) e, conseqüentemente, ocasionaria a extração do ar.

## Conclusões

Esse artigo foi motivado pela falta de conhecimento sobre valores de  $C_p$ s médios do vento em construções geométricas complexas. Embora, muitos estudos sobre as distribuições médias de pressão do vento em edifícios foram realizados, a grande maioria desses estudos se concentrou em geometrias de edifícios simples, sem detalhes sobre edifícios com *sheds*, que são importantes porque alteram significativamente o padrão de fluxo de ar e a distribuição geral dos  $C_p$ s nas superfícies dos edifícios. Através dos resultados encontrados, constatou-se que a forma arquitetônica interfere diretamente na distribuição das pressões nas superfícies dos edifícios, assim como o ângulo de incidência dos ventos externos. Nota-se, claramente, a grande complexidade da distribuição dos  $C_p$ s ao longo da cobertura do edifício com *sheds*. Na fachada a barlavento, a meia altura da fachada, os valores de  $C_p$  se convergem apresentando valores muito similares para a geometria simples e a complexa. No entanto, ao longo do eixo da fachada, nota-se uma divergência em função das diferentes geometrias. A presença dos *sheds* na cobertura produz um perfil de  $C_p$  diferente ao longo da fachada, principalmente na região inferior e superior, registrando zonas de pressão mais baixas, causadas pela multiplicidade de áreas de separação de fluxo e recirculações induzidas pelos *sheds* na cobertura. Essa divergência não é capturada pelo  $C_p$  médio da fachada, comprovando que a adoção desse valor como dado de entrada dos *softwares* de desempenho térmico pode ocasionar resultados equivocados.

No caso do paralelepípedo, a sua geometria simples forma uma única sombra de vento na cobertura gerando  $C_p$ s negativos ao longo de toda a superfície da cobertura. Já a inclinação do *shed* gera uma zona de separação depressurária junto às superfícies verticais, onde geralmente se localizam as aberturas na cobertura com *sheds* e, assim, valores de  $C_p$ s mais negativos, que favoreceriam a sucção do ar pela cobertura. Esse efeito ocasiona nitidamente uma sombra de vento no *shed* posterior e, assim, valores de  $C_p$ s significativamente mais baixos.

Por fim notou-se uma diferença na distribuição dos Cps na cobertura do edifício com *sheds* em função do ângulo de incidência dos ventos externos. No caso a 0° a corrente de ar do primeiro dispositivo funciona como acelerador da velocidade, obtendo valores de Cps menos negativos em função das altas velocidades do ar, o que no caso de 180° tem-se uma grande sombra de vento, que possibilita valores de Cp significativamente mais baixos (valores mais negativos). Já nos *sheds* posteriores, esse efeito é menos intenso, devido à redução da velocidade dos ventos. Estes resultados mostram que a mudança na geometria do modelo e no ângulo de incidência dos ventos externos pode levar a desvios muito grandes na distribuição dos Cps na superfície dos edifícios. Isso implica que valores precisos de Cps para geometrias complexas são cruciais para avaliação do desempenho do fluxo de ar interno.

## Referencias

- Allard, F. (1998). *Natural ventilation in buildings: a design handbook*. London: James & James.
- Awbi, H. B. (1998). *Ventilation of Buildings*. London: E & FN Spon.
- Bittencourt, L. Cândido C. (2008). *Introdução à ventilação natural*. Maceió: Edufal.
- Brandão, R. S. (2009). *As interações espaciais urbanas e o clima*. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Building Research Establishment. (1978). *Principles of natural ventilation*. BRE Digest n. 210. BRE, Garston.
- Calautit, J. K.; Hughes, B. R. (2014). Wind tunnel and CFD study of the natural ventilation performance of a commercial multi-directional wind tower. *Building and environment*, v. 80, p. 71-83.
- Cost (2004). *Cost Action 14: Recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment*. Bruxelas: COST.
- Cóstola D., Blocken B., Hensen J. L. M. (2009). Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. *Build Environ*; 44:2027e36.
- Cóstola, D. (2006). *Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação*. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Cóstola, D.; Alucci, M. P. (2011). Aplicação de CFD para o cálculo de coeficientes de pressão externos nas aberturas de um edifício. *Revista ambiente construído*, v. 11, n. 1, p. 145-158, jan. / mar.
- Crawley, D., Hand, J., Kummert, M., Griffith, B. (2008). Contrasting the capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs. *Building and Environment*, v. 43, n. 4, p. 661-673.
- Delaunay D., Lakehal D., Pierrat D. (1995). Numerical approach for wind loads prediction on buildings and structures. *J Wind Eng Ind Aerodyn*; 57:307.
- Etheridge, D. W.; Sandberg, M. (1996). *Building ventilation: theory & measure*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Franke J., Hellsten A., Schlünzen H., Carissimo B. (2007). *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*. Brussels.
- Harries, A. (2005). *notas de aula*. In: *Workshop: CFX – FAU/USP*. São Paulo.
- Karava P., Stathopoulos T., Athienitis A. K. (2004). Wind driven flow through openings e a review of discharge coefficients. *Int J Vent*; 3:255e66.
- Kim Y. C., Yoshida A., Tamura Y. (2012). Characteristics of surface wind pressures on low-rise building located among large group of surrounding buildings. *Eng Struct*; 35:18e28
- Levitan M. L., Mehta K. C., Vann W. P., Holmes J.D. (1991). Field measurements of pressures on the Texas tech building. *J Wind Eng Ind Aerodyn*; 38:227e34
- Leite, C. G. (2008). *Alterações da ventilação urbana frente ao processo de verticalização de avenidas litorâneas: o caso da avenida litorânea de São Luís/MA*. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Stathopoulos T., Zhu X. (1988). Wind pressures on building with appurtenances. *J Wind Eng Ind Aerodyn*; 31:265e81.
- Montazeri H., Azizian R. (2008). Experimental study on natural ventilation performance of one-sided wind catcher. *Build Environ*; 43:2193e202.
- Orme, M. L. (1999). *Applicable models for air infiltration and ventilation calculations: technical note 51: AIVC*.
- Prata, A. R. (2005). *Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural no meio urbano*. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Stathopoulos T. (1999). Computational wind engineering: past achievements and future challenges. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1997;67e68:509e32.
- Uematsu Y., Isyumov N. Wind pressures acting on low-rise buildings. *J Wind Eng Ind Aerodyn*; 82:1e25.
- Santamouris, M.; Wouters, P. (2006). *Building ventilation: the state of the art*. London: Earthscan.
- Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *J Wind Eng Ind Aerod*; 96(10e11):1749e61.
- Wit, S. (2001). *Uncertainty in Predictions of Thermal Comfort in Buildings*. Thesis (PhD thesis), School of Civil Engineering, University of Nottingham.



# Simulación del comportamiento energético de edificios en entornos urbanos

Energy performance simulation of buildings in urban environments

Massimo Palme

Universidad Católica del Norte, Escuela de Arquitectura  
Av. Angamos 610, 124000 Antofagasta, Chile  
[mpalme@ucn.cl](mailto:mpalme@ucn.cl)

Agnese Salvati

Brunel University London  
London, UK  
[Agnese.Salvati@brunel.ac.uk](mailto:Agnese.Salvati@brunel.ac.uk)

Claudio Carrasco

Universidad de Valparaíso, Facultad de Ingeniería  
Valparaíso, Chile  
[Claudio.carrasco@uv.cl](mailto:Claudio.carrasco@uv.cl)

Manuscript Code: 034

Date of Acceptance/Reception:

## Resumen

Este artículo presenta una metodología para incorporar el entorno urbano en la simulación de desempeño de edificios. A través de la herramienta Urban Weather Generator se obtienen datos climáticos urbanos, luego se diseña un modelo que pueda tener cuenta de sombras y modificaciones en los intercambios radiantes del entorno para ser simulado en TRNSYS v.17. Los resultados muestran que la simulación se optimiza considerando los diferentes efectos del entorno urbano: las sombras balancean el aumento de temperatura debido a la isla de calor y el entorno radiante acaba definiendo con más exactitud las demandas de energía de los edificios en un entorno urbanizado.

**Palabras claves:** Isla de calor, Simulación energética de edificios, Modelos de sombras

## Abstract

This research describes a methodology to include the urban environment in the building performance simulation. By using the Urban Weather Generator urban weather data are obtained, than a model to consider shadows and infra-red environment is designed and building performance simulation is conducted in TRNSYSv. 17. Results show that building performance simulation is optimized by the inclusion of the different effects of the urban environment: shadows balances the temperature increase caused by urban heat island y the infra-red environment finishes defining exactly the energy needs of buildings in an urbanized environment.

**Keywords:** CFD simulation; natural ventilation; pressure coefficients; parallelepiped building; sheds roof building

## Introducción

La incorporación de la isla de calor en las simulaciones del comportamiento energético de los edificios ha sido uno de los tópicos más importantes de los últimos años para la comunidad de la simulación de edificios (Palme et al. 2017; Reinhart y Davila, 2016). La simulación urbana, como campo relativamente nuevo de aplicación, pone sin embargo problemas más complejos que la simulación del comportamiento de edificios. En general, existen dos enfoques para simular entornos urbanos: uno *top-down* y uno *bottom-up* (Kavgic et al. 2010; Li et al. 2017). Con el enfoque *top-down* se consideran grupos enteros de edificios como una sola entidad energética, mientras que con el enfoque *bottom-up* se construyen escenarios energéticos urbanos a partir de simulaciones sobre edificios de referencia. En este último caso, se requiere de una estrategia estadística para poder escalar los resultados desde el edificio a la ciudad o barrio. Para poder realizar simulaciones en entornos urbanos, es necesario como primer paso obtener unos datos meteorológicos que representen tal entorno. Una de las herramientas que ha sido utilizada para tal finalidad es el software Urban Weather Generator, que acopla un simulador atmosférico con un simulador de edificios para obtener unos files en formato .epw del clima urbano. Sin embargo, los datos obtenidos a través de UWG dan cuenta solamente de una parte de los efectos de la urbanización, en lo específico modifican la temperatura y la humedad del



aire en fichero climático. Otros factores muy importantes, como el entorno radiante en términos de sombras frente a la radiación solar y de superficies de intercambio infra-rojo, no son modificados por la herramienta. En este trabajo se presenta una metodología para tomar en cuenta estos efectos y los resultados de la aplicación a dos casos de estudio en la ciudad de Antofagasta y Valparaíso.

## Metodología

En este artículo, se presenta una metodología de cálculo de las influencias del ambiente urbano sobre el comportamiento energético de edificios que se articula en 4 pasos: 1) generación de clima urbano con UWG; 2) generación de máscaras de sombras; 3) estimación de las temperaturas del entorno radiante; 4) simulación con TRNSYS del comportamiento del edificio. La figura 1 resume el esquema general del trabajo.

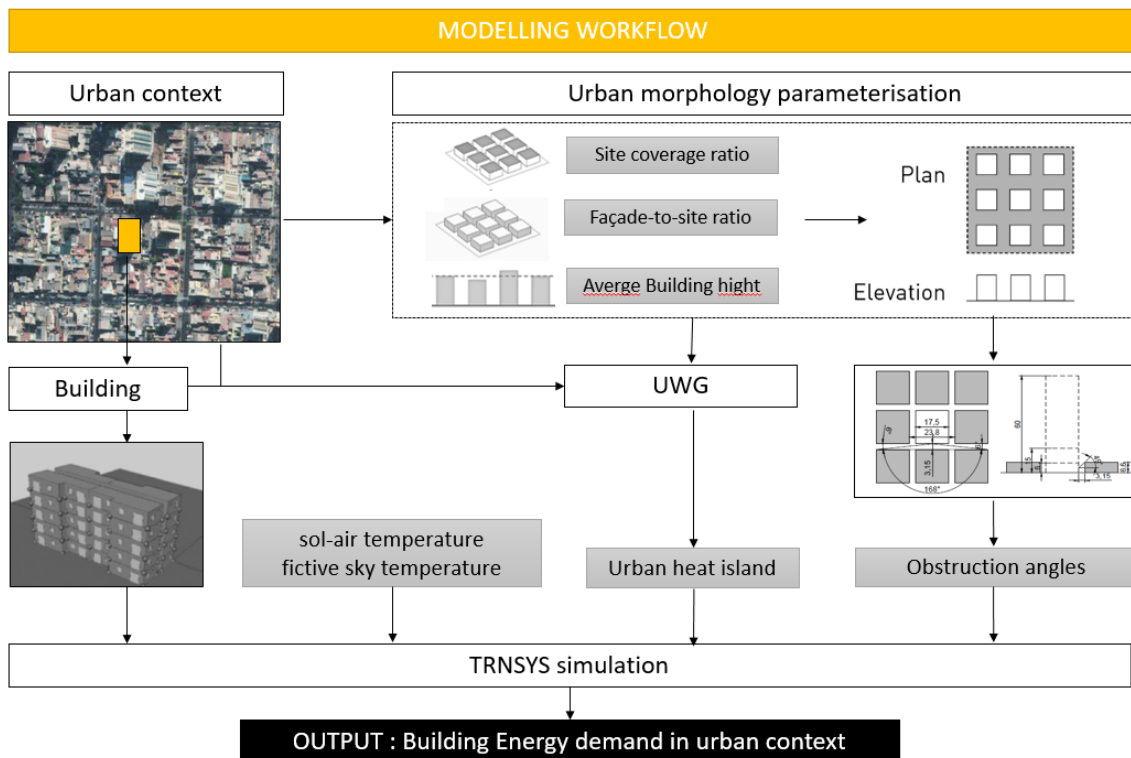


Figura 1. Marco metodológico general

### Generación de los datos de clima urbano

UWG necesita de muchos parámetros de entrada para poder realizar su cálculo. Entre ellos, los más importantes son: 1) los datos relativos a la forma urbana; 2) los datos de absorción y emisividad superficial de los materiales; 3) los datos relativos a la generación de calor directa en los entornos urbanos, básicamente por los vehículos. Este trabajo utiliza una estrategia de observación remota con sistemas de información geográfica (SIG) para estimar los parámetros urbanos y la materialidad de los entornos a considerar. Los parámetros urbanos que deben ser cuantificados con precisión son:

- Superficie construida en el entorno
- Relación de fachada desarrollada respecto a la superficie del entorno
- Altura media de los edificios

Las ecuaciones para determinar la superficie construida y la relación de fachada son las siguientes:

$$S = \frac{\sum A_{edificios}}{A_{sitio}} \quad (1)$$

$$F = \frac{\sum Perimetro \times h_{media\ pesada}}{A_{sitio}} \quad (2)$$

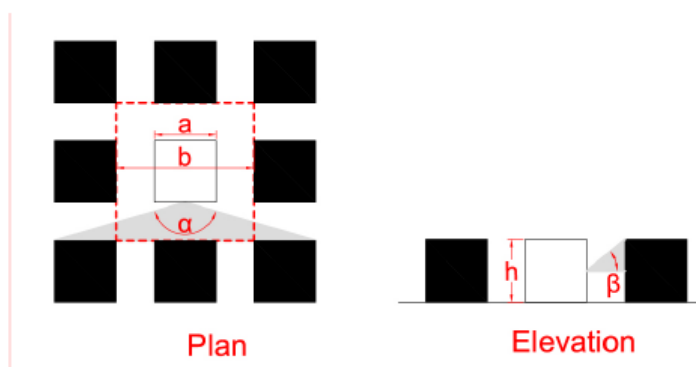
### Máscaras de sombra entre edificios

A partir de los valores de S y F calculados anteriormente, se construye un entorno de sombra representativo. Para insertar en TRNSYS la máscara de sombra, se necesitan dos ángulos: uno de elevación y el otro acimutal. Estos dos ángulos se obtienen a partir de las relaciones entre ancho de los edificios y de las calles (en un entorno de retícula regular a base cuadrada) y alturas, según las siguientes ecuaciones:

$$S = \frac{a^2}{\left(\frac{a+b}{2}\right)^2} \quad (3)$$

$$F = \frac{4a \times h_{media\ pesada}}{\left(\frac{a+b}{2}\right)^2} \quad (4)$$

Figura 2. Obtención de los ángulos de elevación y acimut



### Entorno infra-rojo

La incorporación de las sombras entre edificios no resuelve el problema de forma exhaustiva. La presencia de estas barreras seguramente evita la absorción de cierta cantidad de radiación, sin embargo tiene también otro efecto: pone como superficie de intercambio de onda larga las paredes de los mismos edificios, que van a sustituir la que en un entorno rural sería una combinación al 50% de cielo y terreno. Las paredes de los edificios se encuentran a una

temperatura que es seguramente muy superior a la temperatura ficticia del cielo, por lo tanto al tomar en cuenta las sombras sin más cambios en el modelo se estaría sobrestimando la reducción de carga térmica del edificio en objeto. Para calcular la temperatura de intercambio radiante, se puede utilizar la aproximación de considerar suelo y superficie verticales como en equilibrio, por lo tanto se deberá evaluar una única temperatura de intercambio (a parte la del cielo). Para ello se utilizan las fórmulas siguientes para el caso urbano y rural respectivamente:

$$T_{suelo} = T_{ambiente\ urbano} + 0.2 \times \alpha \times I_H \times fvc \quad (5)$$

$$T_{suelo} = T_{ambiente} + \frac{\alpha \times I_H - 100 \times \varepsilon \times (1 - C)}{9.42 + 3.68 \times v} \quad (6)$$

En donde:

- $\alpha$  es el coeficiente de absorción solar
- $\varepsilon$  es la emisividad infra-roja
- $I_H$  es la radiación horizontal incidente
- $C$  es el porcentaje de cielo cubierto
- $fvc$  es el factor de vista de cielo
- $v$  es la velocidad del viento

### Simulación del desempeño del edificio

La simulación de desempeño del edificio se ha realizado en dos tipologías de edificios residenciales: una casa apareada y un edificio de departamentos de cinco pisos. La tabla resume los valores asignados a las principales propiedades de los materiales y los porcentajes de superficie transparente de las fachadas.

Table 1. Parámetros de materiales

|                                     | Muro                | Piso | Techo                            | Ventana |
|-------------------------------------|---------------------|------|----------------------------------|---------|
| U (W/m <sup>2</sup> K)              | 2.15                | 1.79 | 0.48                             | 5.81    |
| h <sub>e</sub> (W/m <sup>2</sup> K) | 25                  | 0    | 25                               | 25      |
| h <sub>i</sub> (W/m <sup>2</sup> K) | 8                   | 6    | 10                               | 8       |
| M (kJ/m <sup>3</sup> )              | 1400                | 1400 | 950                              | 80      |
| $\alpha$ (solar)                    | 0.6                 | 0.6  | 0.4                              | /       |
| $\varepsilon$ (infra-red)           | 0.9                 | 0.9  | 0.9                              | /       |
| g-value                             | /                   | /    | /                                | 0.85    |
|                                     | <b>Casa pareada</b> |      | <b>Edificio de departamentos</b> |         |
| Porcentaje ventana                  | 16%                 |      | 32%                              |         |

Tabla 2. Parámetros de simulación

| Solar protection          | Cooling set-point | Lighting            | Gains              |
|---------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| 70%                       | 26 °C             | 10 W/m <sup>2</sup> | 5 W/m <sup>2</sup> |
| People                    | Lighting schedule | Activity            | Occupancy schedule |
| 25 m <sup>2</sup> /person | 18-24             | 1 Met               | 0-24               |

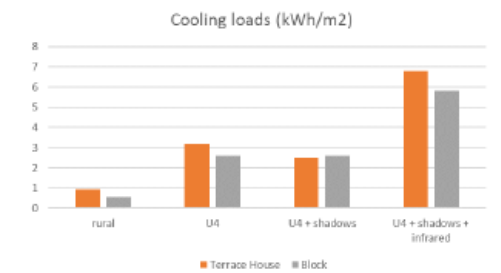
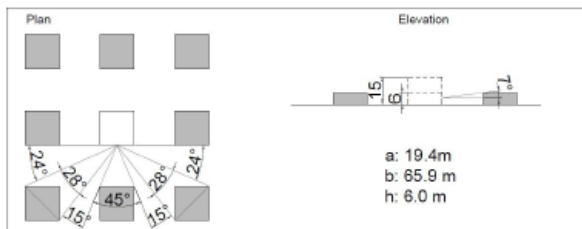
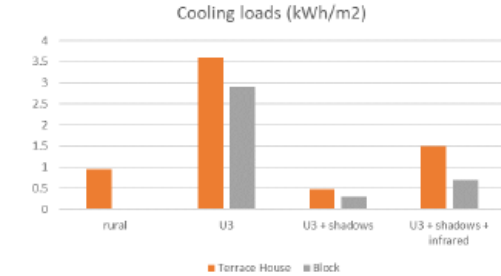
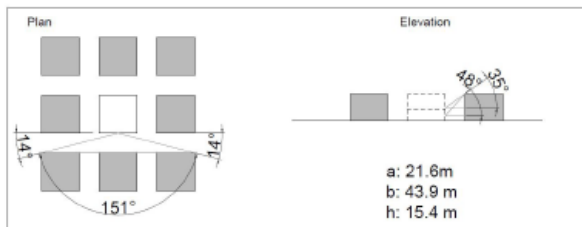
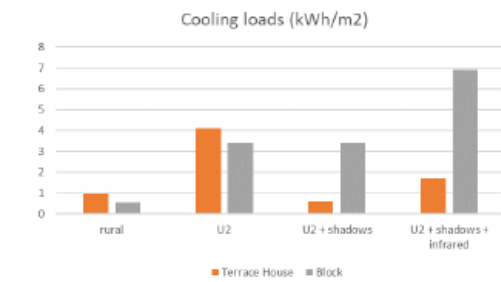
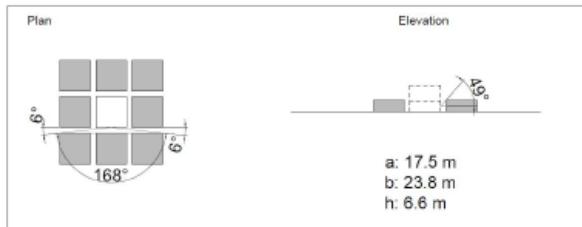
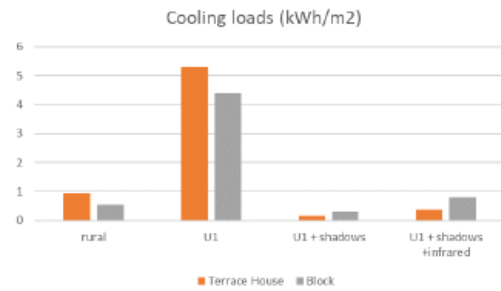
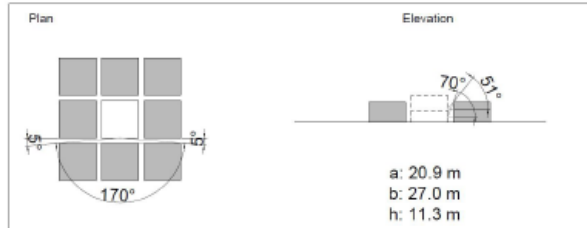
Tabla 3. Características de los sectores analizados

| Urban morphology | Built-up area | Façade to site ratio | Average height |
|------------------|---------------|----------------------|----------------|
| Case 1           | 0.76          | 1.65                 | 11.3           |
| Case 2           | 0.69          | 0.81                 | 6.6            |
| Case 3           | 0.42          | 2.06                 | 15.4           |
| Case 4           | 0.23          | 0.32                 | 6.0            |

## Resultados

Los resultados obtenidos por los diferentes casos de estudio analizados muestran que la utilización de los archivos climáticos modificados generados por herramientas como UWG de por sí solos pueden conducir a una estimación equivocada de la demanda de refrigeración de los edificios. Esto principalmente debido a la presencia de sombras que reducen la ganancia solar y por lo tanto balancean el efecto del aumento de temperatura debido a la isla de calor. Sin embargo, la incorporación de las sombras en la simulación TRNSYS puede conducir al efecto contrario: la estimación de la reducción de ganancia térmica no tiene directamente en cuenta que las sombras generan un aumento en la temperatura radiante porque bloquean el sol pero también reducen el factor de vista del cielo. La utilización de ecuaciones que calibren el entorno radiante se vuelve una necesidad. En la mayoría de los casos, los resultados finales conducen a valores de demanda de refrigeración intermedios entre los estimados por aumento de temperatura del ambiente y los que reducen las ganancias solares. Cabe destacar que en alguna situación específica, como por ejemplo el caso 4, en donde las sombras no son muy profundas porque el entorno no es muy denso, la modificación del ambiente radiante genera un aumento general de las demandas, por encima de los valores obtenidos considerando solamente el aumento de temperatura urbana.

Figura 3. Modelos para sombras y resultados de demanda para los 4 casos estudiados



Este trabajo ha presentado una metodología para la optimización de simulaciones de desempeño de edificios en entornos urbanos, considerando como elementos fundamentales: la generación de datos modificados por la isla de calor; la generación de un entorno de sombra a la radiación solar; la modificación de las temperaturas del ambiente radiante que circunda el edificio a simular. La metodología utiliza una parametrización de sectores reales de una ciudad a través de sistemas de análisis geográfica. Estos parámetros son tratados hasta obtener la generación de un entorno representativo de la realidad, como típicamente sucede en los modelos bottom-up. Los resultados de la aplicación a los primeros casos de estudio confirman la idea inicial de la importancia de construir esquemas para tomar en cuenta todas las modificaciones en el clima introducidas por el entorno urbano. La necesidad de reducir determinadas complejidades hace que el proceso de optimización no sea todavía completo, futuras mejoras en el modelo podrían incluir: 1) una más fina estimación de la temperatura del entorno radiante como media pesada de las superficies que lo constituyen con sus propiedades y factores de vista específicos; 2) un cálculo de la influencia de las brisas en las temperaturas superficiales de los entornos urbanos; 3) un cálculo de la aportación directa de calor debido a actividades humanas sobre base horaria.

## Referencias

- Kavgic, M., Mavrogianni, A., Mumovic, D., Summerfield, A., Stevanovic, Z., & Djurovic-Petrovic, M. (2010). A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and Environment*, 45(7), 1683–1697. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.021>
- Li, W., Zhou, Y., Cetin, K., Eom, J., Wang, Y., Chen, G., Zhang, X. (2017). Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures. *Energy* 141, 2445-2457.
- Masson, V. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94(3), 357–397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>.
- Palme, M., Inostroza, L., Villacreses, G., Lobato, A., Carrasco, C. (2017). From urban climate to energy consumption: Enhancing building performance simulation by including the urban heat island effect. *Energy and Buildings* 145,
- Palme, M., Inostroza, L., Villacreses, G., Lobato, A., Carrasco, C. (2017). Urban weather data and building models for the inclusion of the urban heat island effect in building performance simulation. *Data in brief* 14,
- Reinhart, C. and Davila, C. (2016). Urban building energy modeling – A review of a nascent field. *Building and Environment* 97, 196-202



# Desenvolvimento de metamodelos para a avaliação do nível de eficiência energética da envoltória em edificações residenciais

## Development of metamodels to assess the energy efficiency level of envelope in residential buildings

### Ana Paula Melo

Universidade Federal de Santa Catarina  
Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - Florianópolis, Brazil, 88040-900.  
a.p.melo@posgrad.ufsc.br

### Roberto Lamberts

Universidade Federal de Santa Catarina  
Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - Florianópolis, Brazil, 88040-900.  
roberto.lamberts@ufsc.br

**Manuscript Code:** XXX (esto no debe llenarse)

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018 (esto no debe llenarse)

### Resumo

O objetivo principal deste estudo é desenvolver um método para avaliar o nível de eficiência energética do envelope em edificações residenciais brasileiras. A primeira etapa do estudo descreveu os parâmetros de entrada e seus respectivos valores. A segunda etapa da avaliação consiste na aplicação da técnica de amostragem Hipercubo Latino para combinar os efeitos de diferentes parâmetros de entrada. Todos os casos foram simulados através do programa de simulação computacional EnergyPlus. Com base nos resultados, aplicou-se a técnica de modelagem estatística da rede neural para o desenvolvimento de três metamodelos: carga térmica de resfriamento e aquecimento, e conforto. O último passo é a validação dos metamodelos propostos. Os resultados deste trabalho mostraram que a aplicação da técnica da rede neural artificial permitiu a representação da interação entre os dados de entrada e saída.

**Palabras claves:** metamodelo; simulação termo-energética de edificações, redes neurais artificiais.

### Abstract

The main objective of this study is to develop a method to assess the energy efficiency level of envelope in Brazilian residential buildings. The first step described the input parameters and its values. The second step of the assessment consisted of applying the Latin Hypercube sampling technique to combine the effects of several input parameters. All samplings were run through building energy simulation by EnergyPlus program. Based on results, the neural network statistical modelling technique was applied to develop three metamodels: cooling and heating thermal load, and comfort. The last step is the validation of the proposed metamodels. The results of this work have showed that the application the artificial neural network technique allowed the interaction between input and output data to be represented.

**Keywords:** metamodel; building energy simulation; artificial neural network.

## Introdução

A preocupação com o uso racional de energia vem se intensificando em razão dos custos operacionais para as edificações condicionadas. Desde a década de 70, os países vêm buscando investimento em pesquisas e o uso de tecnologias para medidas de conservação de energia e melhoria da eficiência energética de edificações. Mecanismos e programas de incentivos com o uso de tecnologias mais eficientes estão sendo desenvolvidos, juntamente com o desenvolvimento de regulamentações visando à avaliação e classificação de edificações com base no seu desempenho térmico (Pérez-Lombard et al.; 2009).

Atualmente, existem diversas certificações para a avaliação do desempenho térmico das edificações. Muitas destas normas e leis em eficiência energética de edificações são baseadas nos conceitos da ASHRAE Standard 90.1 (ASHRAE, 2017) que estabelece requisitos mínimos para o projeto de edificações eficientes, exceto para edificações residenciais de pequeno porte. Destaca-se o sistema de certificação LEED (Leadership in Energy and Environmental Design, 20), que se baseia nos requisitos do Apêndice G da ASHRAE Standard 90.1 para tornar a edificação mais eficiente energeticamente. Outra norma desenvolvida pelos Estados Unidos é a Title 24 (California Energy Commission, 2001), a qual é de caráter obrigatório para as novas edificações no estado da Califórnia, USA, e permite avaliar as edificações através de um método prescritivo ou através de método de avaliação de desempenho térmico. Muitos dos países da Europa possuem seu próprio método de certificação, como é o caso de Portugal, Holanda, Reino Unido, e Holanda. (RCCTE, 2006; NEN 2916, 1994)

Em 2001, com a crise do setor elétrico, o Brasil começou a estabelecer ações para estimular o uso eficiente da energia elétrica. A primeira versão do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (RTQ-R) foi publicada em 2010, posteriormente substituída pela versão de 2012 (INMETRO, 2012). Esse regulamento começou a ser desenvolvido após a elaboração da Lei Nº 10.295, a qual estabelece a criação de mecanismos que resultem em edificações mais eficientes energeticamente (BRASIL, 2001). A implementação deste regulamento reflete na busca por construções eficientes, apresentando uma grande melhoria na eficiência energética dos edifícios brasileiros.

O RTQ-R visa a etiquetagem de edificações residenciais no Brasil, classificando pelo nível de eficiência que variam de eficiência A (mais eficiente) a E (menos eficiente). Os dois métodos para a avaliação do nível final de eficiência da edificação são: método prescritivo, que se refere a um modelo simplificado onde são atribuídos pesos a cada requisito; ou através do método de simulação, que adota a utilização de um programa de simulação computacional. Através da utilização de programas de simulação energética é possível avaliar o desempenho térmico e energético de edificações. Porém, destaca-se a necessidade de conhecimento de diferentes sistemas e uma demanda considerável de tempo e recursos. Já os métodos simplificados tem o objetivo de facilitar as análises desejadas pelo usuário, adotando diversas suposições quanto ao clima, padrões de uso e tipo de construções.

O metamodelo desenvolvido para o uso no RTQ-R baseou-se em estudos que utilizaram métodos de amostragem para compreender o comportamento de milhares de simulações computacionais e chegar em uma regressão linear múltipla, capaz de avaliar a envoltória da edificação. O método de regressão linear múltipla é um método simples de desenvolver e fácil de utilizar quando comparado ao uso de programas de simulação computacional. Entretanto, existem métodos estatísticos que se destacam quanto à qualidade superior frente a outros métodos estatísticos, como por exemplo as redes neurais artificiais.

Com relação à técnica de amostragem, o RTQ-R adotou a mudança de somente um parâmetro para cada novo caso. Esta técnica permite observar a influência de cada parâmetro no resultado do dado de saída da simulação, porém exige que sejam elaborados diversos casos. Através de outras técnicas de amostragem, como o método Hipercubo Latino é possível analisar a influência da combinação de diferentes fatores e reduzir o número de casos analisados sem perder a precisão e qualidade dos dados de entrada.

## Estado da arte

Desde 2010, o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais vem passando por avaliações e proposição de melhorias. A aplicação do método e do zoneamento bioclimático para obter edificações mais confortáveis e ao mesmo tempo eficientes energeticamente são alguns destaques de limitações abordadas em estudo. Além disso, o método atual não possui um indicador de desempenho de fácil entendimento e comparação. Outra limitação é a obtenção de resultados não equivalentes, quando comparado ao método de análise da NBR 15575-1 (ABNT, 2013) e (SILVA e GHISI, 2014). Destaca-se também a impossibilidade do uso da ventilação natural em conjunto com o condicionamento artificial para as edificações residenciais; e utilização do método estatístico de regressão linear múltipla, que não foi capaz de entender a influência dos dados de entrada no dado de saída.

Dentre a proposta deste estudo, está o desenvolvimento de um novo metamodelo para a avaliação da eficiência energética da envoltória de edificações residenciais, considerando simultaneamente o uso de ventilação natural e do sistema de condicionamento de ar em edificações. Além de permitir avaliar o consumo de energia para aquecimento e resfriamento, e expressa também as horas de conforto da edificação. Este metamodelo abrange grande parte das soluções arquitetônicas encontradas em edificações residenciais brasileiras de acordo com às características climáticas do clima que esta será inserida.

## Método

### Definição dos dados de entrada

Com relação às tipologias, foram consideradas diferentes informações de área construída, números de pavimento tipo, residência unifamiliar e multifamiliar, pavimentos localizados na cobertura, e pavimentos tipo. Foram consideradas por tipologia a variação de 1 a 3 dormitórios e 1 sala. Os dormitórios possuem janelas em uma ou duas fachadas, de acordo com o número de fachadas expostas. As portas dos ambientes dos modelos de simulação estão sempre fechadas, ou seja, a ventilação ocorre por frestas.



Com relação aos dados de entrada e suas respectivas características, foram adotados valores para abranger as características de grande parte das edificações brasileiras variando estes valores de mínimos a máximos. Foram selecionadas 32 parâmetros de entrada, das quais 28 estão relacionados a edificação, listados na Tabela 1; e 4 relacionados com as variáveis climáticas para representar a influência do clima no metamodelo (Tabela 2).

**Tabela 1.** Parâmetros da edificação e seus valores limites.

| Variável  | Valores limites                                |
|---|--|
| Tipo de ambiente  | Sala ou dormitório                             |
| Percentual de vidro na fachada norte                            | 0.1 - 0.9                                      |
| Percentual de vidro na fachada leste                            | 0.1 - 0.9                                      |
| Percentual de vidro na fachada sul                              | 0.1 - 0.9                                      |
| Percentual de vidro na fachada oeste                            | 0.1 - 0.9                                      |
| Área de fachada norte [m <sup>2</sup> ]                         | 0 -150   |
| Área de fachada leste [m <sup>2</sup> ]                         | 0 -150   |
| Área de fachada sul [m <sup>2</sup> ]                           | 0 -150   |
| Área de fachada oeste [m <sup>2</sup> ]                         | 0 -150   |
| Área do ambiente [m <sup>2</sup> ]                              | 8 -300   |
| Capacidade térmica das paredes externas [kJ/(m <sup>2</sup> K)] | 20 -300  |
| Transmitância térmica das paredes externas [W/m <sup>2</sup> K] | 0.5 -3.5                                       |
| Capacidade térmica da cobertura [kJ/(m <sup>2</sup> K)]         | 30 -300  |
| Transmitância térmica da cobertura [W/m <sup>2</sup> K]         | 0.5 -3.5                                       |
| Transmitância do vidro [W/m <sup>2</sup> K]                     | 2.8 -5.7                                       |
| Fator solar do vidro  | 0.22 -0.87                                     |
| Tipo de piso do pavimento                                       | Madeira ou cerâmico                            |
| Pé direito [m]  | 2.5 -5   |
| Absortância solar das paredes externas                          | 0.1 -0.9                                       |
| Absortância solar da cobertura                                  | 0.1 -0.9                                       |
| Tamanho da projeção [m]   | 0 -2   |
| Altura do pavimento [m]   | 0 -50  |
| Veneziana   | Sem ou com                                     |
| Altura da janela em relação ao pé direito [%]                   | 0 -100   |
| Fator de abertura para ventilação (%)                           | 50 -100  |
| Pilotis   | Sem ou com                                     |
| Exposição do piso   | Laje entre pavimentos ou em contato com o solo |
| Exposição da cobertura  | Laje entre pavimentos ou exposta ao exterior   |

**Tabela 2.** Parâmetros climáticos e sua respectiva sigla.

| Variável  | Sigla |
|---|-------|
| Temperatura Média Anual                                       | TMA   |
| Desvio Padrão da Média mensal das Temperaturas Médias diárias | dpT   |
| Amplitude Média Anual   | AMA   |
| Desvio Padrão da Amplitude Média mensal                       | dpA   |

Para cada dado de entrada considerou-se a inclusão de valores dentro de intervalos aceitáveis fisicamente ou possíveis de serem encontrados em edificações residenciais.

Os dados de entrada fixos considerados para cada caso analisado estão descritos na Tabela 3.

A partir da variação de cada parâmetro, definiu-se a quantidade de casos. O produto da análise combinatória de todos os parâmetros resultou em aproximadamente 260 bilhões de casos. Entretanto, este número foi reduzido para 60.000 casos por meio da aplicação do método de amostragem por Hipercubo Latino, por meio de códigos de programação em linguagens Python e R.

**Tabela 3.** Rotinas e condições adotadas no modelo base.

| Parâmetro descrito                                 | Ambiente |            |
|--|----------|------------|
|  | Sala     | Dormitório |
| Horário de ocupação                                | 14h-22h  | 22h-8h     |
| Horários com possibilidade de ventilação           | 14h-22h  | 14h-8h     |
| Horários com possibilidade de AC <sup>1</sup>      | 14h-22h  | 22h-8h     |
| Temperatura de acionamento do AC para resfriamento | 26°C     | 26°C       |
| Temperatura de acionamento do AC para aquecimento  | 16°C     | 16°C       |
| Temperatura de setpoint de resfriamento do AC      | 23°C     | 23°C       |
| Temperatura de setpoint de aquecimento do AC       | 18°C     | 18°C       |

<sup>1</sup> AC = sistema de condicionamento de ar

### Simulação computacional

Após a geração de todos os casos, adotou-se o programa de simulação computacional EnergyPlus, versão 8.7 (DOE, 2017) para obter o consumo final de energia para cada caso. Com base nestes resultados foi possível observar a influência dos dados de entrada no consumo final das edificações (kWh/m<sup>2</sup>.ano) para aquecimento e resfriamento, e nas horas de conforto para cada ambiente de permanência prolongada da edificação. O percentual de horas de conforto é calculado através do somatório de horas entre 18°C e 26°C (temperatura operativa do ambiente) sem uso do sistema de condicionamento de ar, dividido pelo total de horas ocupadas do ambiente.

No modelo de simulação computacional, a ventilação natural será acionada somente após respeitar três condições: 1. A temperatura interna deve ser maior que temperatura externa; 2. A temperatura interna deve ser maior que 19°C; e 3. Permitir o horário de ventilação.

A temperatura de acionamento do sistema de condicionamento de ar é de 26°C para resfriamento e 16°C para aquecimento na sala e nos dormitórios. Porém, o setpoint do sistema é de 23°C para resfriamento e 18°C para aquecimento. Sempre que o sistema de condicionamento de ar for acionado na sala e nos dormitórios, este permanece ligado até o último horário de ocupação do ambiente.

As venezianas estão acopladas às janelas dos ambientes de permanência prolongada somente quando estas estiverem fechadas. O controle da integração das estratégias de condicionamento natural com o condicionamento artificial foi definido por meio do *Energy Management System* (EMS) do programa EnergyPlus, assim como o uso das venezianas.

Todas as análises foram realizadas de acordo com a nova proposta de zoneamento climático brasileiro (Roriz, 2014) que se baseia em um total de 24 zonas climáticas. Os arquivos climáticos adotados são do tipo INMET (LabEEE, 2016).

### Técnica de modelagem estatística

As redes neurais artificiais foram o modelo preditivo escolhido para substituir a simulação energética. Cada variável de saída é predita por uma rede neural específica, a partir de 32 variáveis de entrada. O número de neurônios na camada interna das redes neurais variou de acordo com a variável de saída. Destaca-se a inclusão das variáveis climáticas na matriz de parâmetros que foi utilizada para o treinamento do metamodelo, possibilitando a consideração de resultados obtidos em diferentes climas em uma única rede neural artificial.

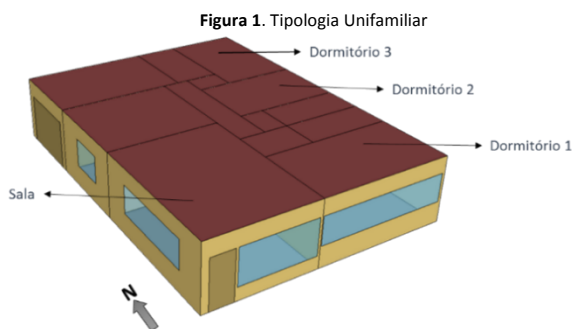
Para o desenvolvimento dos metamodelos, adotou-se o método estatístico de redes neurais com a utilização do programa R. O desenvolvimento foi baseado em 60.000 casos, com diferentes combinações de parâmetros. Foram desenvolvidos 3 novos metamodelos, analisando os parâmetros mencionados como dados da camada de entrada (variáveis independentes), e o consumo da edificação para aquecimento e resfriamento em kWh/m<sup>2</sup>, e o percentual de horas de conforto como dado de saída (variável dependente) para o treinamento da rede neural.

### Validação

Os metamodelos são desenvolvidos a partir de diversos parâmetros, que podem apresentar comportamentos não-lineares entre os dados de entrada e o dado de saída. A análise da precisão do metamodelo é a etapa principal do desenvolvimento da ferramenta para entender o seu comportamento.

A validação consiste na aplicação do modelo simplificado desenvolvido, para avaliação da precisão dos seus respectivos resultados. O método consiste em analisar parametricamente os dados de entrada do metamodelo, verificando os dados de saída obtidos. A tipologia adotada como caso base foi uma edificação unifamiliar possuindo

três dormitórios, com áreas de 18,75 m<sup>2</sup>, 13,73 m<sup>2</sup> e 15,25 m<sup>2</sup>, e uma sala com 30,90 m<sup>2</sup>. A edificação foi considerada sem sombreamento (brise ou veneziana), sendo o fator de abertura para ventilação igual a 50% da área de vão. O piso está em contato com o solo e a cobertura exposta. A perspectiva da tipologia é apresentada na Figura 1. A validação foi realizada para três cidades brasileiras com características climáticas distintas: Belém Curitiba e São Paulo.

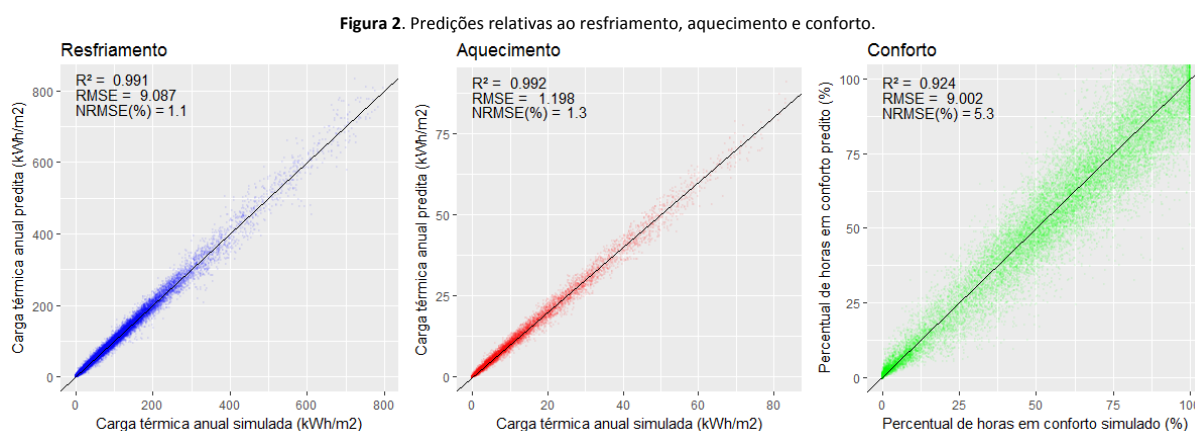


## Resultados

### Desenvolvimento dos metamodelos

Para o desenvolvimento dos metamodelos ppor meio do método estatístico de redes neurais, foram selecionados um total de 25% dos casos para validação da rede, 25% para verificar o desempenho da rede e o restante para o treinamento da rede. Os resultados do treinamento dos metamodelos podem ser observados através da Figura 2.

O treinamento dos casos selecionados apresentou um bom desempenho, uma vez que os valores concentraram-se próximo a reta. Nota-se que praticamente todos os valores preditos pelo metamodelo correspondem com os valores simulados pelo programa de simulação EnergyPlus.



Através dos resultados obtidos com a aplicação da rede neural, foi calculado o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), a erro quadrático médio (RMSE) e o erro quadrático médio normalizado (NRMSE). Estes resultados foram obtidos com a comparação entre os resultados do programa EnergyPlus e do método estatístico de redes neurais uma vez que ambos possuem os resultados na mesma unidade, kWh/m<sup>2</sup>.

Os resultados do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), do erro quadrático médio (RMSE) e do erro quadrático médio normalizado (NRMSE) para o metamodelo de resfriamento é de 0.99, 9,087 e 1.1%, respectivamente. Para o metamodelo de aquecimento os valores encontrados foram próximos aos resultados do metamodelo de aquecimento, exceto o valor de RMSE de aproximadamente 1,20. Para o metamodelo de conforto, a diferença em realção ao metamodelo de resfriamento é no valor de NRMSE com aproximadamente 5.3%.

### Validação dos metamodelos

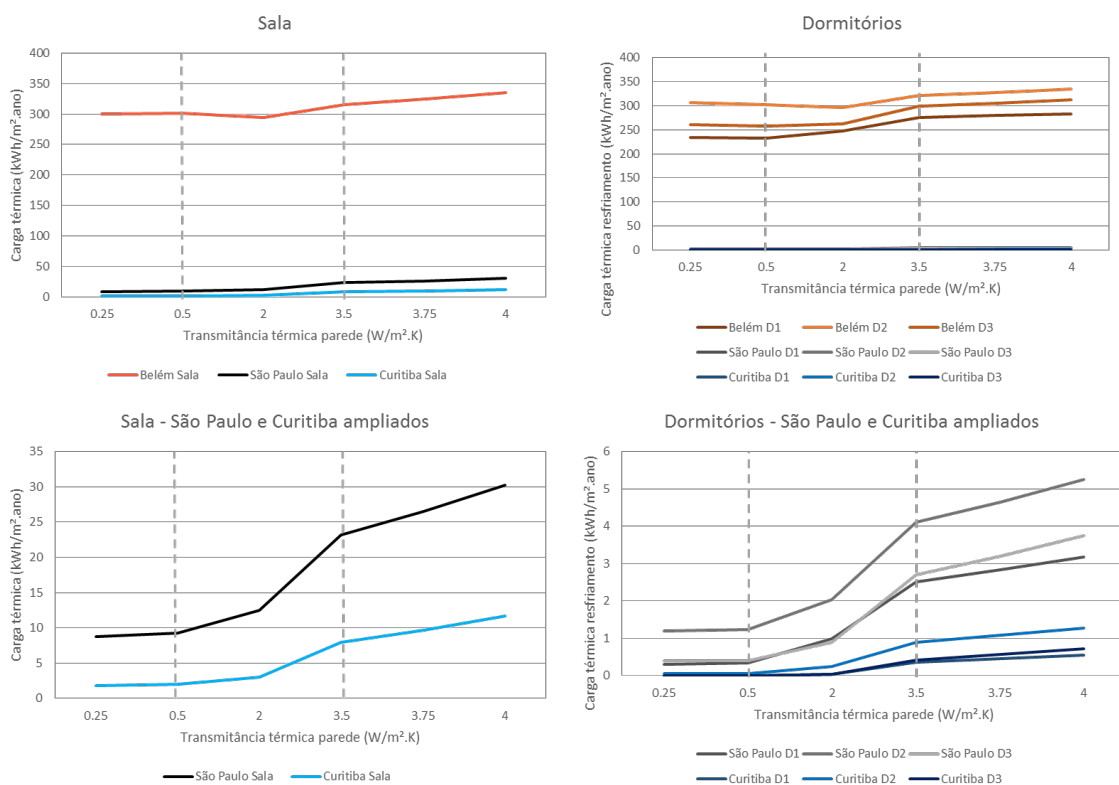
Dentre os dados de entrada analisados, serão apresentados os resultados para o parâmetro transmitância térmica das paredes externas, e exposição do piso (contato com o solo) com relação ao metamodelo de resfriamento e aquecimento.

Em todos os gráficos será utilizada a abreviação D1, D2 e D3, para os dormitórios 1, 2 e 3, respectivamente. Destaca-se também que as figuras possuem escalas diferentes para melhorar a visualização do comportamento do resultado de carga térmica. O clima de Curitiba e São Paulo, por apresentarem valores inferiores a Belém, foram analisados separadamente. As linhas tracejadas verticais indicam os limites máximo e mínimo do metamodelo. O clima de Belém não é considerado para a análise de aquecimento por ser um clima com verões e invernos quentes.

Analisando os resultados, observa-se que o metamodelo respondeu de forma satisfatória para os dados de entrada que estão dentro do limite máximo e mínimo. E, mesmo com os limites extrapolados, a inclinação do gráfico de carga térmica de aquecimento/resfriamento apresentou comportamento semelhante aos valores dentro dos limites para a maioria dos casos.

Para a transmitância térmica das paredes externas, o metamodelo apresentou um aumento da carga térmica com o aumento do valor deste parâmetro. Com os limites extrapolados, o metamodelo teve comportamento semelhante aos valores dentro do limite de aplicação. Na Figura 3 é possível observar a variação para o resfriamento e na Figura 4 para o aquecimento. Em Belém, para a sala, quando utilizado o valor extrapolado de 0,25 W/m<sup>2</sup>.K a carga térmica encontrada foi de 300 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Para 2,00 W/m<sup>2</sup>.K o valor foi 294 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Em São Paulo e Curitiba os valores seguem o mesmo padrão, porém com grandezas inferiores, variando de 0 kWh/m<sup>2</sup>.ano até 30 kWh/m<sup>2</sup>.ano.

Figura 3. Transmitância térmica – resfriamento.



Para a exposição do piso ao solo, somente a sala em Belém aumentou a sua carga térmica com a exposição, o resfriamento passou de 254 kWh/m<sup>2</sup>.ano para 295 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Nos demais ambientes houve redução. Em Belém, a carga térmica reduziu entre 3% e 9% nos dormitórios. Em Curitiba, para o resfriamento, a carga térmica passou de 13 kWh/m<sup>2</sup>.ano para 4 kWh/m<sup>2</sup>.ano na sala e nos dormitórios reduziu entre 93% a 98%, chegando a valores de 0,09 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Para o aquecimento, houve aumento de aproximadamente 15% nos dormitórios, na sala a necessidade de aquecimento reduziu. Em São Paulo o comportamento foi semelhante a cidade de Curitiba para o resfriamento, com reduções menores, mas significativas. A necessidade de aquecimento reduziu em todos os ambientes. Os resultados podem ser visualizados nas Figura 8 e Figura 9.

Figura 4. Transmitância térmica – aquecimento.

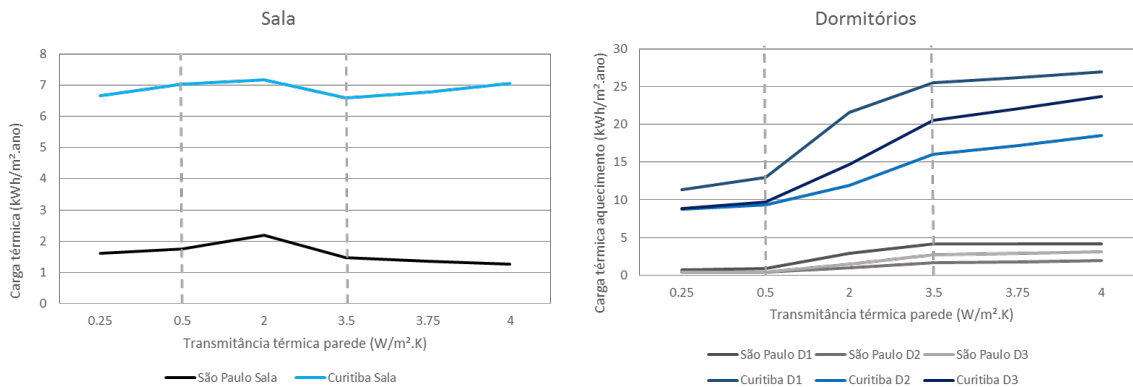


Figura 5. Exposição do piso – resfriamento.

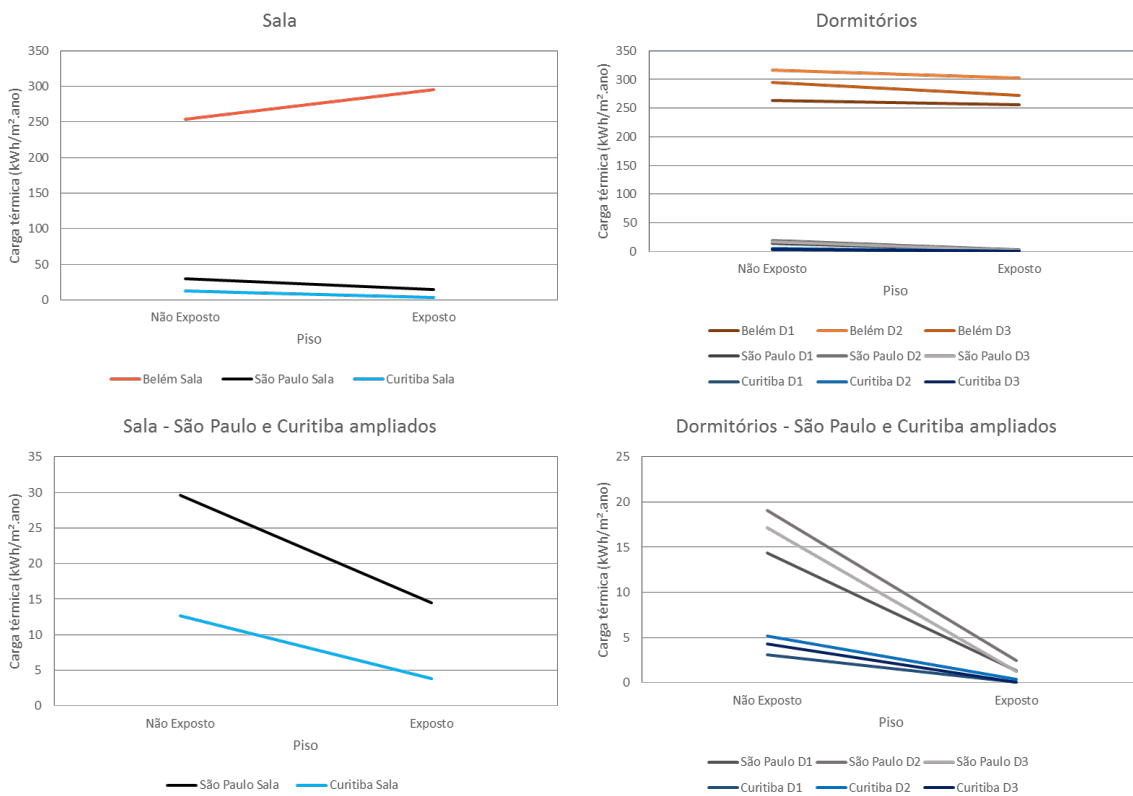
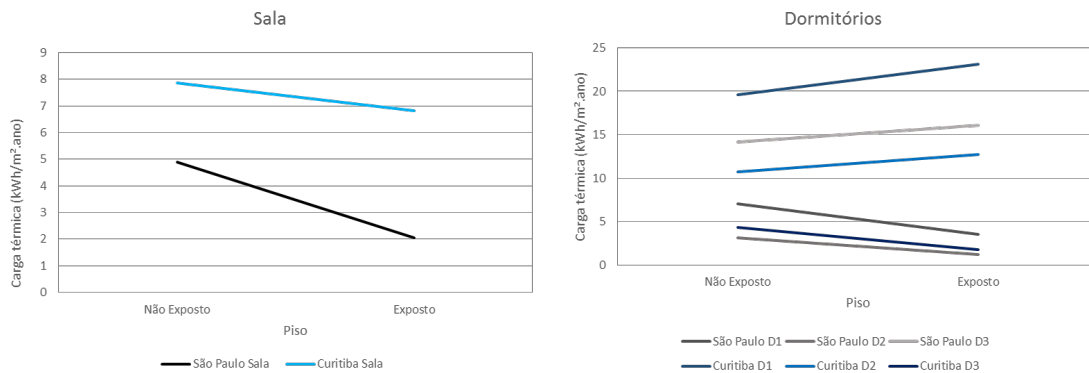


Figura 6. Exposição do piso – aquecimento.



## Discussões e Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um metamodelo para a análise da eficiência energética da envoltória de edificações residenciais, considerando simultaneamente o uso de ventilação natural e do sistema de condicionamento de ar em edificações. O estudo deu ênfase no Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Com base nos resultados é possível ressaltar as seguintes conclusões:

- A aplicação do método estatístico de redes neurais apresentou resultados com pouca diferença quando comparados com os resultados do programa EnergyPlus;
- A aplicação do método Hipercubo Latino reduz o número de casos a ser gerado para determinada análise, sem influenciar na qualidade dos resultados;
- A aplicação do método estatístico de redes neurais permitiu abranger todas as tipologias com diferentes áreas de projeção de cobertura em uma única equação;
- Os metamodelo de resfriamento, aquecimento e conforto respondem satisfatoriamente a influência dos dados de entrada no dado de saída;
- A combinação dos dados de entrada de uma edificação pode representar em um aumento ou redução da carga térmica de resfriamento da edificação;
- A economia de energia vai depender do clima e das combinações entre os fatores da edificação que está sendo analisada;
- O estudo e análise do potencial de economia de energia da edificação podem auxiliar para uma configuração mais eficiente energeticamente do espaço urbano, o qual é especialmente relevante em países com grande taxa de crescimento nas áreas urbanas, como é o caso do Brasil.

## Agradecimentos

Este trabalho agradece à ELETROBRAS pelos recursos financeiros fornecidos aplicados no financiamento do projeto.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 15575-1: Edifícios habitacionais - Desempenho: parte 1: Requisitos gerais. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013.
- ASHRAE, AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. ASHRAE Standard 90.1-2017. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 2017.
- AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD. About the Australian Building Codes Board. 2008. Disponível em: <http://www.abcb.gov.au/about-the-australian-building-codes-board> Acesso em: 05 dezembro 2010.
- BRASIL. Lei n. 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Brasília, DF, 2001b. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/lei10295.pdf> Acesso em: 24 de março de 2011.
- CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. Energy efficiency standards for residential and nonresidential buildings. Sacramento: California Energy Commission, 2001. 166 p.
- DOE – Department of Energy. Programa EnergyPlus - versão 8.7. Disponível em: <https://energyplus.net/> Acesso em: 19 de outubro 2017.
- EU Official Journal, 2003. Directive on the energy performance of buildings 2002/91/CE. 4 of January, 2003.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. Portaria n.º 18, de 16 de janeiro de 2012. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.pbefedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTQR.pdf> Acesso em: março de 2018.
- LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. Arquivos Climáticos INMET. Disponível em <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016> Acesso em março de 2018.
- NEN 2916, Energy performance of non-residential buildings - Determination method (em holandês), NNI, Delft (The Netherlands), 1994.
- PÉREZ-LOMBARD, L., ORTIZ, J., GONZÁLEZ, R., MAESTRE, I. R. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. Energy and Buildings, v.41, n.3, p 272-278, 2009.
- RORIZ, M. Proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro – Versão 3.0. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. Data: Março de 2014. Disponível em: [http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas\\_v3.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf). Acesso em: Março de 2018.
- SILVA, A.S.; GHISI, E. Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1. Ambiente

# Optimización multi-objetivo de estrategias de eficiencia energética en un campamento minero existente en la Cordillera de los Andes.

## Multi-objective optimization of energy efficiency measures in an existing mining camp in the Andes mountain.

### Annelore Dietz Muñoz

Filiación: Pontificia Universidad Católica de Chile

Dirección: Av. Providencia 1459, departamento 403, Providencia. 7500564

Correo: [aidietz@uc.cl](mailto:aidietz@uc.cl)

### Sergio Vera Araya

Filiación: Pontificia Universidad Católica de Chile

Dirección: Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul. 7820436

Correo: [svera@ing.puc.cl](mailto:svera@ing.puc.cl)

**Manuscript Code:** 037

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

### Resumen

La industria de la minería es uno de los mayores consumidores de energía eléctrica, consumiendo un 32% del total de producción eléctrica de Chile. Uno de los desafíos actuales de las instituciones mineras es proveer una buena calidad de vida a sus trabajadores y minimizar el consumo de energía de sus campamentos mineros. Reportes de sustentabilidad de las compañías mineras muestran que el consumo promedio de los campamentos mineros varía entre 350 y 500 kWh/m<sup>2</sup>. El presente trabajo tiene como objetivo optimizar el diseño de la envolvente de un campamento minero para minimizar el consumo total de energía eléctrica y, a la vez, mejorando la calidad de ambiente interior. Para esto, se llevó a cabo una optimización multi-objetivo mediante la herramienta de optimización GenOpt acoplado con EnergyPlus, donde se optimizó parámetros de la envolvente, orientación, iluminación, sistema de climatización e incorporando una restricción de sobrecalentamiento. Se tomaron en consideración las condiciones de diseño, geográficas y climáticas de los campamentos mineros que influyen en el desempeño energético. Para esto, el estudio se basa en un campamento minero real, Quebrada Blanca 2, el cual posee un área total de 30.000 m<sup>2</sup>, se encuentra a 4.400 msnm en la Cordillera de los Andes y está construido de módulos prefabricados de madera. Los principales resultados muestran que las estrategias de eficiencia energética optimizadas con la restricción de sobrecalentamiento alcanzan a reducir el consumo base del campamento en un 65.8% y mejorar la calidad de ambiente interior evitando el sobrecalentamiento. La optimización realizada permite descubrir un largo conjunto de estrategias aplicables con efecto directo en el consumo energético de los campamentos y calidad de ambiente interior, las cuales dan flexibilidad en el diseño, dependiendo de los objetivos y resultados deseados. Estos conjuntos de estrategias pueden ser aplicadas tanto en nuevos proyectos como en proyectos de rehabilitación.

**Palabras claves:** Simulación energética de edificios, optimización multi-objetivo, confort térmico, campamentos mineros, módulos prefabricados de madera

### Abstract

The mining industry is one of the largest energy consumers in Chile with 32% of the total electricity consumption of the whole country. One of the current challenges of the mining institutions is to provide a good life quality to their workers and to minimize the energy consumption of the mining camps. Sustainable reports of mining companies show that electric energy consumption of mining camps vary between 350 and 500 kWh/m<sup>2</sup> year. This work aims to optimize the building envelope to minimize the mining camp energy consumption and to improve the Indoor Environmental Quality (IEQ). A multi-objective optimization is carried out using GenOpt as the optimization engine coupled with EnergyPlus. The main parameters that are evaluated correspond to roofs, walls and floors insulation, U-value and SHGC of windows, window area, orientation, HVAC system, and lighting power density including an overheating constraint. The design, geographic and climatic conditions of the mining camps that influence energy performance were taken into consideration. To do this, a real mining camp, Quebrada Blanca 2, is used as case study. Quebrada Blanca 2 has a built area of 30.000 m<sup>2</sup>, is located at 4.400 m.a.s.l. in the Andes Mountain and is built of timber prefabricated lightweight modules. The main results show that the optimized energy efficiency strategies with the overheating constraint can reduce up to 65.8% the base-case mining camp energy consumption and improve the indoor environmental quality avoiding overheating. These optimizations allow us to discover a long set of applicable strategies with direct effect on the energy consumption of the mining camp and the IEQ, which give flexibility in the design, depending on the objectives and desired results.

**Keywords:** Building energy simulation, multi-objective optimization, thermal comfort, mining camps, timber prefabricated modules

## Introducción

Hoy en día es imperante mejorar la calidad de vida de los trabajadores y disminuir el consumo energético en la minería. El sector de la minería en Chile es responsable del 32% del consumo total de electricidad, el cual se pronostica que crecerá en un 53% entre el 2014 y 2026 (COCHILCO, 2016; Minsiterio de Energía, 2015). Esto se debe principalmente al alto uso de energía eléctrica en las mineras generada principalmente por las centrales eléctricas de carbón y el uso de combustibles fósiles (Zúñiga, 2009). El 80% de los sitios mineros se encuentran en zonas remotas sobre los 3.000 msnm, lo que implica que requieran construir campamentos para poder alojar a los trabajadores. Los campamentos mineros deben tener casino, dormitorios, oficinas, lavandería, salas de estar, entre otros, lo que conlleva a que el tamaño de estos varíe entre los 6.500 y 95.000 m<sup>2</sup> para alojar entre 600 y 7.000 trabajadores (Correa3 Arquitectos Ltda, 2011). En este contexto, el consumo de los campamentos varía entre los 350 a 500 kWh/m<sup>2</sup> año. Las condiciones ambientales desérticas de altura presentes en esas localidades tienen características atmosféricas particulares, tales como baja humedad en el aire, reducción del oxígeno en 30%, aumento radiación ultravioleta en 30%, presión del aire disminuye en 30% y clima frío que generan dificultades físicas a los trabajadores. Esto, en conjunto con las largas jornadas laborales dificulta su calidad de vida (Departamento de Estudios de la Dirección del Trabajo., 2011; Dirección del Trabajo, 2010). El objetivo de este trabajo es optimizar el diseño de la envolvente de un campamento minero para minimizar el consumo total de energía eléctrica mejorando la calidad de ambiente interior.

## Estado del arte del problema

Para alcanzar buenos niveles de calidad de ambiente interior, el parámetro más importante es el confort térmico (Al horr et al., 2016). Los módulos prefabricados de madera suelen sufrir grandes fluctuaciones de temperatura en invierno y verano debido a la falta de masa térmica en su envolvente y su alto nivel de infiltraciones (Navarro, De Garcia, Solé, Castell, & Cabeza, 2012; Soares, Santos, Gervásio, Costa, & Simões da Silva, 2017). Por otro lado, al implementar estrategias de eficiencia energética para reducir el consumo energético de edificios, especialmente aumentar la hermeticidad de la envolvente y la aislación térmica, suele provocar sobrecalentamiento (Marin et al., 2016). Basado en esto, se requiere incluir el riesgo de sobrecalentamiento en la optimización para minimizar el riesgo de sobrecalentamiento, aumentar la calidad de ambiente interior y reducir el consumo energético de los campamentos mineros. Previas investigaciones han estudiado la optimización de estrategias de eficiencia energética en diferentes tipos de edificios. Shi et al. (2016) revisó el estado del arte de optimizaciones de estrategias de eficiencia energética basado en 116 casos de estudio donde, solo el 27% se realizó en casos de estudios reales y, la gran mayoría de los estudios se realiza en viviendas residenciales y comerciales. Los edificios no-residenciales y no-comerciales requieren ser estudiados debido a la heterogeneidad de actividades que se conducen a su interior (Buso & Corgnati, 2017). Esta particularidad de los edificios no-residenciales y no-comerciales hace interesante estudiar el efecto de las estrategias de eficiencia energética en su consumo energético total y en el sobrecalentamiento.

## Metodología

### Caso de estudio

Quebrada Blanca 2, un campamento minero real, ubicado a 4.400 msnm se utiliza como caso de estudio. Este campamento tiene capacidad para 1.700 personas y posee un área total de 30.317 m<sup>2</sup> distribuida en 15 bloques construidos por módulos prefabricados de madera. Trece de estos son edificios de dormitorios de 2 pisos, otro es el edificio central y el otro un edificio de oficinas, todos estos unidos por un pasillo techado. Los edificios de dormitorios se dividen en 4 tipos: los edificios de piezas simples son los de tipo A, los de tipo B son piezas dobles, y los edificios A-1 y B-1 son también piezas simples y dobles respetivamente, pero con menor cantidad de piezas por edificio (ver **Figura 2**)

Se utiliza EnergyPlus como software de simulación energética de edificios para estimar el consumo base del campamento. Para esto, se utilizaron los valores y características del campamento descritas en la **Tabla 1**. Todas las estrategias de eficiencia energética a optimizar se comparan con el consumo estimado del caso base.

El consumo del campamento minero es totalmente eléctrico, siendo el agua caliente sanitaria abastecida con termos eléctricos y las cocinas también son eléctricas. Bajo estas condiciones, el consumo del campamento se compone por el



consumo asociado a 4 parámetros: Calefacción, iluminación, agua caliente sanitaria y equipos eléctricos. Las zonas calefaccionadas son las oficinas y los dormitorios mediante calefactores eléctricos.

Figura 2. Planta Quebrada Blanca 2 (Tecnofast, 2012)

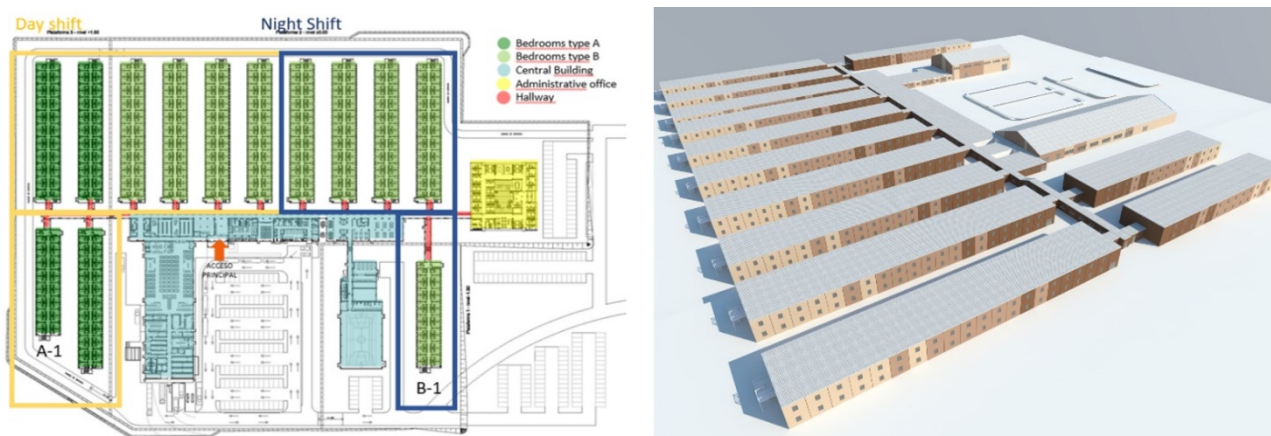


Tabla 1. Características simuladas del campamento minero

| Thermal resistances values |                 |   |                     |
|----------------------------|-----------------|---|---------------------|
| Dining room and Gymnasium  | External Wall   | Superwall (100 mm polyurethane)<br>U-value= 0.19 W/m <sup>2</sup> K                                 |                     |
|                            | Roof            | Glamet techmet (100 mm Polyurethane)<br>U-value= 0.19 W/m <sup>2</sup> K                            |                     |
| All others                 | Ground Floor    | 100 mm concrete floor. U-value= 0.06 W/m <sup>2</sup> K   |                     |
|                            | External Wall   | (11 mm Wood composite, 140 mm Mineral wool; 15 mm gypsum board)<br>U-value= 0.29 W/m <sup>2</sup> K |                     |
|                            | Roof            | (1.2 mm PVC layer; 15 mm OSB layer; 140 mm Mineral wool) U-value = 0.3 W/m <sup>2</sup> K           |                     |
|                            | Ground Floor    | (9.5 OSB layer; 140 mm Mineral wool; 16 mm plywood)<br>U-value = 0.28 W/m <sup>2</sup> K            |                     |
| Thermal mass               | None            |   |                     |
| Window type                | Aluminum        | Double glazing window thickness of 6 mm and an air gap of 6 mm (SGHC = 0.7)                         |                     |
|                            | Window          | U-value = 0.32 W/m <sup>2</sup> K   |                     |
| Occupants                  | 1700 workers:   | Bedrooms day shift occupied from 19:30-7:30   |                     |
|                            |                 | Bedrooms night shift occupied from 7:30-19:30   |                     |
|                            |                 | Offices occupied from 7:30-19:30  |                     |
|                            |                 | Dining room occupied from 6:00-9:00; 12:00-15:30; 18:00-21:00                                       |                     |
| Setpoint temperatures      | Bedrooms        | Kitchen occupied from 5:30-21:30  |                     |
|                            | Offices         | Heating setpoint: 20°C  |                     |
| DHW                        | Bedrooms type A | 3600 l;   | Bedrooms A-1 3000 l |
|                            | Bedrooms type B | 7200 l;   | Bedrooms B-1 5400 l |
|                            | Kitchen         | 120 l   |                     |
|                            | Gym bathrooms   | 800 l   |                     |
| Infiltration rate          | 2 ACH           |   |                     |

### Metodología de optimización

Para mejorar la calidad de ambiente interior y disminuir el consumo energético se definió un conjunto de parámetros de diseño a optimizar en base a diferentes estrategias de diseño eficiente existentes. Estas se pueden observar en la Tabla 2. Estas estrategias apuntan a mejorar la envolvente térmica del edificio, reduciendo de esta manera las cargas asociadas en calefacción y a mejorar los equipos de iluminación para también reducir este consumo.

Las estrategias de diseño eficientes presentes en la Tabla 2, se optimizaron en dos casos diferentes, los cuales se diferencian en el sistema de climatización. El caso I se optimizó con el sistema de clima existente en el caso base que se compone de calefactores eléctricos en las habitaciones y oficinas. El caso II se evaluó implementando un sistema

eficiente de calefacción compuesto por bombas de calor y vigas frías en los mismos edificios mencionados anteriormente. Este sistema de calefacción tiene la opción de free-cooling, la cual consiste en aprovechar las bajas temperaturas exteriores para proporcionar enfriamiento y ventilación con bajo consumo energético asociado. La opción de enfriamiento se considera solo en las oficinas.

Tabla 2. Parámetros de diseño a optimizar

| Variable               | Units              | Initial   | Min. | Max.  | Steps | Description                            |
|------------------------|--------------------|-----------|------|-------|-------|--|
| azimuth                | Grados             | -139      | -180 | 180   | 45    | Building orientation                   |
| WindowU                | W/m <sup>2</sup> K | 3         | 1.5  | 3     | 0.5   | U-value                                |
| WindowSHGC             |                    | 0.7       | 0.4  | 0.7   | 0.1   | Solar heat gain coefficient            |
| InsulationConductivity | W/mK               | 0.045     | 0.02 | 0.045 | 0.005 | Walls conductivity                     |
| InsulationThickness    | m                  | 0.14      | 0.1  | 0.16  | 0.01  | Insulation thickness                   |
| Lighting               |                    | Base-case |      |       | 3     | Base-case, LED, LED with motion sensor |
| ACH                    | ACH                | 2         | 0.25 | 2     |       | Infiltrations. ACH= 2; 1; 0.5, 0.25    |
| DeltaNE                | m                  | 0         | -0.5 | 0.5   | 0.25  | High variation window NE bedrooms      |
| DeltaSW                | m                  | 0         | -0.5 | 0.5   | 0.25  | High variation window SO bedrooms      |
| DeltayOffice           | m                  | 0         | 0    | 1     | 0.5   | High variation window office           |

Para llevar a cabo la optimización se tuvo que integrar el software de simulación energética (EnergyPlus) con el software de optimización GenOpt (Asadi, da Silva, Antunes, & Dias, 2012). GenOpt es un motor de optimización que permite optimizar multivariantes en base a la minimización de una función de costo. En este caso, la función a minimizar es el consumo energético del campamento minero, que se compone por equipos eléctricos, agua caliente sanitaria, sistema de climatización e iluminación (Ecuación 1). Para lograr minimizar el consumo energético y a la vez mejorar la calidad de ambiente interior, el sobrecalentamiento se incluye como otro elemento de la función objetivo, como restricción por penalización. Es decir, este factor adquiere un valor muy grande cuando alguna zona se encuentra con sobrecalentamiento. De esta manera, penaliza ese conjunto de parámetros indicando que no es óptimo dado que se genera sobrecalentamiento y el algoritmo de optimización continúa evaluando nuevas soluciones cercanas a los mínimos que va alcanzando.

$$\min_{y \in Y} f(x)$$

Ecuación 1.  $f(x) = \sum(\text{ElectricEquipment} + \text{DHW} + \text{HVAC} + \text{Lighting} + \text{Overheating})$

## Resultados

El consumo estimado del caso base fue de 330 kWh/m<sup>2</sup> año, del cual el 67% corresponde a la energía requerida para calefacción, 20% a los equipos eléctricos, 7% a agua caliente sanitaria y 6% a iluminación. El caso base presentó sobrecalentamiento en las oficinas, debido a las altas cargas internas de esta zona.

Los resultados obtenidos de la optimización del caso I con calefactores eléctricos como sistema de climatización solo permitió reducir en un 6.9% (a 307.25 kWh/m<sup>2</sup> año) el consumo del caso base sin presentar sobrecalentamiento. El óptimo fue alcanzado tras 180 simulaciones, donde se evaluaron distintas combinaciones de parámetros que permitían reducir el consumo energético y no producían sobrecalentamiento en ninguna zona. De los 180 casos evaluados, 157 presentaron sobrecalentamiento. Los casos que cumplieron ambos objetivos están representados por triángulos naranjos en la Figura 3. Como se puede observar, la variabilidad existente entre las soluciones que no presentaron sobrecalentamiento es mínima, lo que indica que mantener el sistema de climatización existente reduce la posibilidad de implementar medidas de eficiencia energética que reduzcan el consumo energético del campamento y mejoren la calidad del ambiente interior y confort térmico.

En cuanto a los resultados del Caso II, con el sistema eficiente de calefacción, se logró alcanzar un óptimo de consumo energético anual de 112.9 kWh/m<sup>2</sup> año. Este valor equivale a una reducción del 65.8% del consumo del caso base. El 58% del óptimo de consumo energético alcanzado corresponde al consumo de equipos eléctricos, el 20% corresponde a agua caliente sanitaria, el 15% a calefacción y un 7% a iluminación. Estos dos últimos factores eran directamente afectados por los parámetros de eficiencia energética optimizados. El proceso de optimización se completó en 260

optimizaciones, de las cuales 177 permitirían reducir el consumo energético y mantener la calidad de ambiente interior (Ver Figura 3).

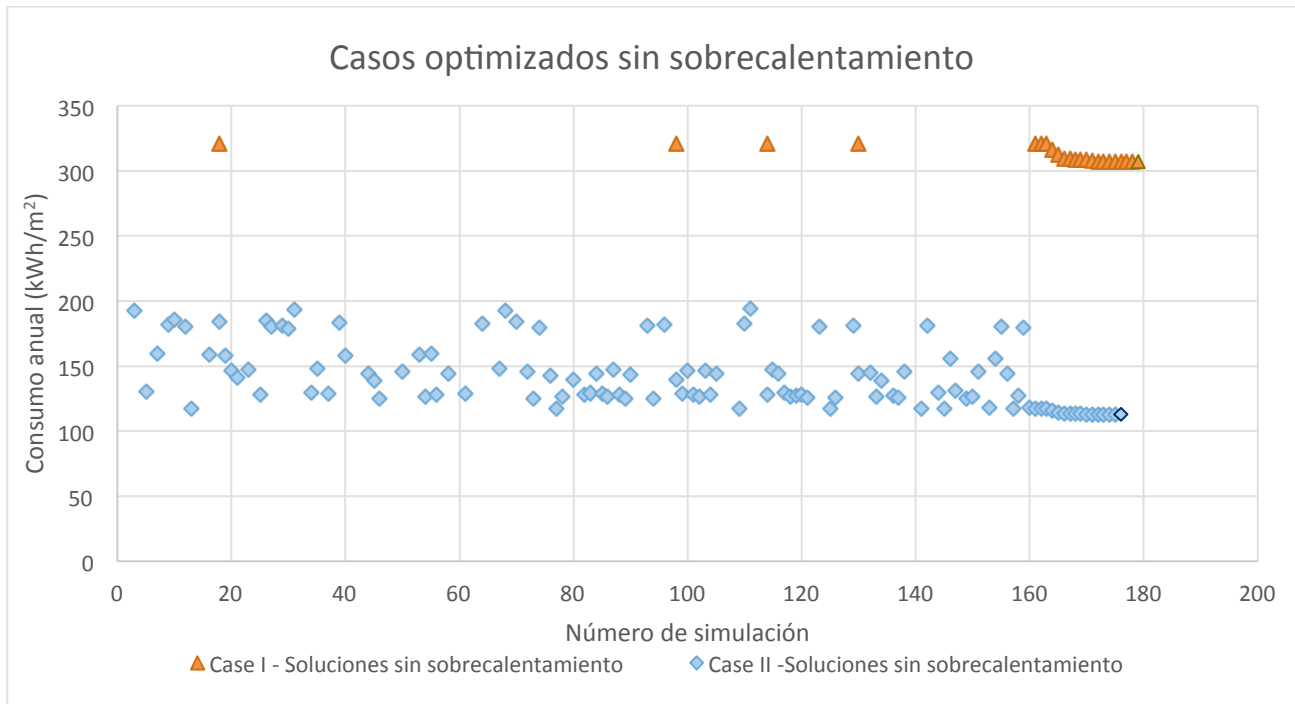


Figura 3. Resultados obtenidos en la optimización del Caso I y Caso II que no presentaron sobrecalentamiento en ninguna zona térmica

En la Figura 3, se puede observar que la variabilidad de consumo energético alcanzado entre las opciones que cumplen ambos objetivos en el Caso II va entre los 194.32 kWh/m<sup>2</sup> año a el óptimo de 112.9 kWh/m<sup>2</sup> año. El conjunto de estrategias de eficiencia energética asociados a estos niveles de consumo permite conocer la gran variabilidad de conjuntos de parámetros implementables que consiguen reducir considerablemente el consumo energético y aumentar la calidad de ambiente interior de todo el campamento minero. De esta manera, en la etapa de diseño se pueden considerar los conjuntos de parámetros que permitan obtener el consumo esperado y respondan de mejor manera a las restricciones propias de cada proyecto. Por ejemplo, la orientación de los campamentos mineros suele determinarse en base a las condiciones geométricas del lugar para que se requiera realizar el menor movimiento de tierra posible. Si este fuera un elemento crítico de diseño, se debería optar por el conjunto de variables de diseño que posea la orientación que permita conseguir ese objetivo.

Las estrategias de eficiencia energética que permiten alcanzar los óptimos del caso I y caso II se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Diseños óptimos de los 2 casos optimizados y el diseño del caso base

| Variable               | Description                         | Units   | Baseline | Case I  | Case II |
|------------------------|-------------------------------------|---------|----------|---------|---------|
| Azimuth                | Building orientation                | Degrees | -139     | 108.5   | -147.4  |
| WindowU                | Thermal transmittance               | W/m2K   | 3        | 1.5     | 1.5     |
| WindowSHGC             | Solar Heat Gain Coefficient         |         | 0.7      | 0.51875 | 0.5     |
| InsulationConductivity | Walls conductivity                  | W/mK    | 0.045    | 0.02    | 0.02    |
| InsulationThickness    | Insulation thickness                | m       | 0.14     | 0.16    | 0.16    |
| Lighting               | Actual, LED, LED with motion sensor |         | Actual   | LEDSM   | LEDSM   |
| ACH                    | Infiltrations. ACH= 2; 1; 0.5, 0.25 | ACH     | 2        | 2       | 0.25    |
| DeltaNE                | High variation window NE bedrooms   | m       | 0        | 0.5     | -0.0625 |
| DeltaSW                | High variation window SO bedrooms   | m       | 0        | 0.5     | 0.25    |
| DeltaOffice            | High variation window office        | m       | 0        | 0.5     | 1       |

## Discusión y Conclusiones

Dos grandes desafíos de la minería en Chile son: minimizar el consumo de energía y mejorar la calidad de vida de sus trabajadores. Esta investigación tiene como objetivo optimizar el diseño de la envolvente de un campamento minero para minimizar el consumo total de energía eléctrica mejorando la calidad de ambiente interior. Esto se lleva a cabo mediante una optimización multi-objetivo implementada en la herramienta de optimización GenOpt acoplado con EnergyPlus. Se definieron estrategias de eficiencia energética a optimizar, tales como mejoras en el desempeño térmico de la envolvente, diferentes orientaciones y distintas fuentes de iluminación. Esto se evaluó con dos sistemas de climatización e incorporando una restricción de sobrecalentamiento que evita que se elija una opción que genere sobrecalentamiento en el campamento minero.

Con los resultados obtenidos en la optimización del Caso I, se puede observar que las estrategias de eficiencia energética optimizadas aumentan el riesgo de sobrecalentamiento al interior del campamento minero, generando sobrecalentamiento en zonas donde no se veía este comportamiento en el caso base, como dormitorios, cocina, entre otras. Las soluciones alcanzadas que cumplen ambos objetivos logran reducir máximo en un 6.9% el consumo energético del caso base. Esto demuestra que si se mantiene el sistema de climatización no solo no se mejora la calidad de ambiente interior y confort de los trabajadores, sino que tampoco se puede alcanzar una minimización considerable del consumo energético del campamento minero.

Para lograr alcanzar un menor consumo energético del campamento con las estrategias de eficiencia energética definidas sin provocar sobrecalentamiento, se realiza la misma optimización del Caso I con un nuevo sistema de climatización en base a vigas frías y bombas de calor que es más eficiente y posee la opción de enfriamiento en oficinas. En este caso se logra reducir el consumo energético del caso base en un 65.8% sin sobrecalentamiento. Esto valores indican la relevancia del sistema de climatización en la implementación de medidas de eficiencia energética sin empeorar la calidad de ambiente interior.

El óptimo diseño del campamento que evita el sobrecalentamiento y disminuye el consumo energético, se alcanzó en el óptimo del caso II, mostrado en la *Tabla 3*. Estos valores en cuanto a rediseño del campamento se pueden alcanzar mediante el diseño de una envolvente con transmitancia térmica igual a  $0.125 \text{ W/m}^2\text{K}$ , incluyendo muros exteriores, cubierta y piso. Los vidrios deben poseer una transmitancia de  $1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  y SHGC de 0.52, lo que se alcanza con ventanas doble low-e o ventanas dobles con argón. Las infiltraciones deben bajarse a 0.25 ACH en todo el edificio y utilizar luces LED con sensor de movimiento en todo el edificio. En cuanto al tamaño de las ventanas, se debe aumentar las ventanas en orientación noreste de los edificios de dormitorios en un 15% mientras que las ventanas de las oficinas y en orientación suroeste del edificio de dormitorios se deben reducir en un 33% y 67% respectivamente.

GenOpt, en conjunto con EnergyPlus son herramientas útiles tanto para realizar optimizaciones multivariadas en torno al desempeño energético de edificios e ingresar restricciones por penalización, como se hizo con el criterio de sobrecalentamiento. El proceso entrega las variables simuladas en cada caso del proceso de optimización, por lo que permite conocer la totalidad de conjuntos de variables que permiten reducir el consumo energético y no generar sobrecalentamiento en el campamento minero. Con estos datos, se puede evaluar en etapa de diseño cuales son las estrategias de eficiencia energética que responden mejor a cada proyecto. De esta manera, esta información es útil tanto para proyectos nuevos como para proyectos de rehabilitación. Sin embargo, en este último, las estrategias de eficiencia energética aplicables podrían variar.

Este trabajo se puede profundizar considerando otras estrategias de eficiencia energética que apunten a reducir el consumo de agua caliente sanitaria e implementar energías renovables que permitan abastecer parcial o totalmente el consumo reducido del campamento minero.

## Agradecimientos

El autor agradece a la empresa Tecnofast, que apoyo y proporcionó información para el desarrollo de este estudio y el apoyo a la investigación Proyecto CONICYT/FONDAP 15110020, Centro de Desarrollo Urbano Sostenible (CEDEUS).

- Al horr, Y., Arif, M., Katafygiotou, M., Mazroei, A., Kaushik, A., & Elsarrag, E. (2016). Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.03.006>
- Asadi, E., da Silva, M. G., Antunes, C. H., & Dias, L. (2012). A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB. *Building and Environment*, 56, 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.005>
- Buso, T., & Corgnati, S. P. (2017). A customized modelling approach for multi-functional buildings – Application to an Italian Reference Hotel. *Applied Energy*, 190, 1302–1315. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.042>
- COCHILCO. (2016). Informe de actualización de emisiones de gases de efecto invernadero directos en la minería del cobre al año 2015. Correa3 Arquitectos Ltda. (2011). Alojamiento Mineros, 73.
- Departamento de Estudios de la Dirección del Trabajo. (2011). *Una aproximación a las condiciones de trabajo en la gran minería de altura. Cuaderno de investigación N°40.*
- Dirección del Trabajo. (2010). Riesgos en la minería de altura geográfica.
- Marin, P., Saffari, M., de Gracia, A., Zhu, X., Farid, M. M., Cabeza, L. F., & Ushak, S. (2016). Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions. *Energy and Buildings*, 129, 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.007>
- Minsiterio de Energía. (2015). Balance Nacional de Energía 2015. *Dirección General de Planeación Energética Chile*, 159. [https://doi.org/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177621/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2015.pdf](https://doi.org/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177621/Balance_Nacional_de_Energ_a_2015.pdf)
- Navarro, L., De Garcia, A., Solé, C., Castell, A., & Cabeza, L. F. (2012). Thermal loads inside buildings with phase change materials: Experimental results. *Energy Procedia*, 30(December), 342–349. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.040>
- Soares, N., Santos, P., Gervásio, H., Costa, J. J., & Simões da Silva, L. (2017). Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78(February), 194–209. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.066>
- Tecnofast. (2012). Oficinas quebrada blanca.
- Zúñiga, A. (2009). Consumo de Energía y Emisiones de gases Efecto Invernadero de la Minería del Cobre en Chile, 2011.



# Simulação computacional do desempenho do conforto térmico de edifício escolar em Brasília - Brasil

Computational simulation of thermal confort performance os shcool's building in Brasília - Brazil

## Jessica Lara

Filiação: Universidade de Brasília

Endereço: 70910-900

Contato: jlaragoncalves@gmail.com

## Teciana Xavier

Filiação: Universidade de Brasília

Endereço: 70910-900

Contato: tecianaxavier@aluno.unb.br

## Caio Silva

Filiação: Universidade de Brasília

Endereço: 70866-100

Contato: caiosilva@unb.br

**Manuscript Code:** 038

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

## Resumo em português

Edifícios consomem aproximadamente 40% da energia global. Diante disso, considera-se urgente encontrar estratégias de eficiência energética a fim de reduzir os impactos no meio-ambiente. Este artigo tem como objetivo apresentar o desempenho termo energético de um edifício escolar localizado na periferia de Brasília - Brasil. O método de trabalho inclui visita in loco, workshop com os alunos da escola analisada, medições de temperatura e dados de simulações desenvolvidas pelo software Energy Plus 6.0 - interface do Design Builder 2.4.2.026. Os resultados mostram que as horas de conforto se alteram em até 28% com o uso de dispositivos bioclimáticos, como o uso de isolamento na cobertura e paredes verdes. Desta forma, essa pesquisa propõe ações de aplicações de dispositivos bioclimáticos baseada em medidas de evidência para informar políticas públicas a importância de espaços de aprendizagem mais confortáveis bioclimaticamente.

**Palavras chaves em português:** Bioclimatismo; escola pública; dispositivos bioclimáticos; simulação computacional.

## Abstract in English

Buildings consume about 50% of global energy. From this perspective, its urgent finding strategies of efficiency energy to reduce the environmental footprint. This article presents the thermal comfort performance of a School's building located in periphery of Brasilia - Brazil. The methodology includes in locus assessment, workshop with students, microclimate measures and modeling process by DesignBuilder 2.4.2.026 software (EnergyPlus 6.0 algorithm). Results show the total of comfortable hours could be improve by 28% when adopted bioclimatic strategies such as insulation layer on the roof surface and green walls. In conclusion, this research proposes bioclimatics retrofit actions based on evidence measures to inform public policies for cooler learning places.

**Keywords in English:** Building performance simulation (BSP); school; bioclimatic retrofit; bioclimatism.

Diante ao cenário atual de constante aumento das temperaturas do planeta, vê-se necessário estudar os fatores que implicam em mudanças na qualidade do conforto térmico dos ambientes e as mudanças que minimizem esses impactos ambientais. No mesmo contexto, de acordo com a Comissão Europeia, a construção civil é responsável por cerca de 40% do consumo de energia mundial, sendo essa então a maior contribuinte de gastos energéticos exacerbados.

O consumo de energia é um importante fator quando se trata da formação de um projeto, portanto é essencial a conscientização do meio técnico e do usuário no sentido de incorporar o consumo de energia como parâmetro de projeto (GRASSO; GHISI; LAMBERTS, 1998). Desse modo, arquitetos e engenheiros influenciam na quantidade do consumo de energia no país, uma vez que edificações planejadas adequadamente, desde a fase inicial de projeto, com aplicação de estratégias bioclimáticas na concepção das edificações e uso de equipamentos energeticamente eficientes, podem reduzir significativamente o consumo de energia (LAMBERTS; GHISI; PAPST, 2000).

Segundo Lamberts (1997), a arquitetura deve ser um elemento que precisa de eficiência energética. Para o mesmo, um edifício é eficiente energeticamente quando possibilita o conforto térmico, visual e acústico com baixo custo de energia. Além disso, a eficiência energética pode trazer melhorias ao uso e a qualidade do ambiente interno das edificações (WESTPHAL; LAMBERTS, 2000). Desse modo, as melhorias na eficiência energética estão diretamente ligadas a qualidade interior dos ambientes, assim como a qualidade do ar e o conforto térmico.

De acordo com Kowaltowski (2001), a adoção de projetos padrão para as edificações escolares tem sido uma das causas de problemas de conforto ambiental. A padronização de edificações públicas, como instituições de ensino, apresenta defeitos quando notamos que essa categoria de construção não se adequa a todos os tipos de implantação, à medida que não é considerado fatores como localização, orientação solar e características climáticas da região, comprometendo assim, a qualidade dos edifícios.

Godoi (2010, apud Kowaltowski 2001), em seu escrito aborda sobre a importância de seguir as exigências do conforto térmico, principalmente no Brasil, país o qual é caracterizado em maior parte pelo clima tropical, de temperaturas elevadas. Entretanto, é possível notar que a maiorias das edificações nas cidades apresentam padronização em seus projetos, sem considerar as características do terreno e do clima.

As características técnicas da construção, o microclima, a temperatura externa, a radiação solar, o vento, as trocas térmicas das paredes e cobertura, os ganhos de calor no interior da edificação através da transmissão desse calor vinda do corpo dos usuários, iluminação e equipamentos eletrônicos, são variáveis que influenciam no balanço energético de uma edificação. Santana (2006, apud European commission directorategeneral for energy, 1995)

O aproveitamento da iluminação e ventilação natural pode diminuir ou eliminar a necessidade de uso da iluminação e elementos de refrigeração artificiais do ambiente. Ao investir nesses elementos que contribuem para a melhoria do conforto térmico e luminoso do edifício, há economia dos gastos públicos com energia das escolas. Esse tipo de problemática ocorrida com frequência em instituições de ensino público na cidade de Brasília, Brasil, foi motivo para a pesquisa em questão.

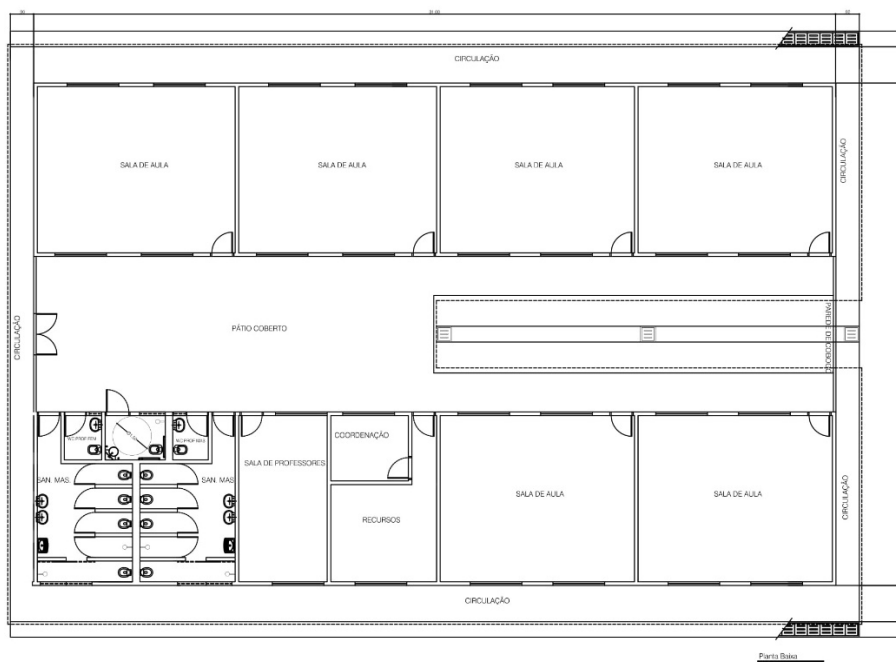
Ao abordar esse tema, tem-se como propósito analisar e exemplificar o acréscimo de dispositivos bioclimáticos em construções de ensino público já realizadas e seus resultados nas temperaturas interna do ambiente, além do aumento do conforto térmico para o usuário.

No contexto brasileiro, muitos edifícios escolares tendem a serem projetados e construídos de forma padronizada sem considerar variáveis de clima de acordo com a localização em que são implantadas, o que acaba por acarretar em ambientes escolares desfavoráveis aos usuários.

Com o intuito de analisar o desempenho do conforto térmico em instituições de ensino público, propôs-se a análise e estudo de dispositivos bioclimáticos que favorecessem o uso dos ambientes de forma a proporcionar um aumento de conforto térmico a partir da diminuição da temperatura do ar interna. Desse modo, O Centro de Ensino Médio (CEM) 01, localizado na região administrativa São Sebastião, zona periférica da cidade de Brasília, foi escolhido como objeto de estudo, a fim de analisar a padronização que as escolas na região são submetidas e os possíveis efeitos que o acréscimo de elementos que proporcionem melhorias nas temperaturas internas do edifício podem acarretar.

A escola, hoje em dia, não possui uma arquitetura diferenciada das outras escolas públicas de Brasília, e até de outras cidades do Brasil. Com dois blocos paralelos de sala de aula que são separados por um pátio central utilizado para socialização dos estudantes durante o intervalo. As salas de aula possuem uma grande precariedade ao se tratar de iluminação e ventilação naturais, onde apenas as paredes que não estão em contato com o pátio possuem janelas, não permitindo uma ventilação cruzada e a luz solar só é presente assim em um pequeno período do tempo, sendo necessário a utilização da luz artificial e de ventiladores durante todo o período de funcionamento da escola.

Figura 1. Planta baixa do Centro de Ensino Fundamental (CEM 01). Fonte: Secretaria de Estado de Educação do Distrito Federal – GDF, 2016.



Todas as observações realizadas sobre a falta de conforto térmico nas escolas foram seguidas por comentários e informações obtidas pelos próprios usuários da escola a partir do projeto realizado. E partir disso foi iniciado o processo de estudo para melhorias no centro de educação.

## Metodologia

Essa pesquisa teve como base o trabalho realizado pelo grupo de pesquisa em Simulação Computacional no Ambiente Construído (SICAC) da Universidade de Brasília, em parceria com o Projeto de Extensão denominado “Escolas Bioclimáticas: Soluções Bioclimáticas para Escolas Públicas”. Neste contexto, esta pesquisa subsidiou o trabalho em andamento do grupo “Estruturas Verdes para Escolas Públicas no Distrito Federal”. Todos os trabalhos citados abordam sobre o conforto térmico nas escolas públicas do Distrito Federal e impulsionaram a pesquisa em questão.



Num primeiro estágio, foi selecionada a escola objeto de estudo, a mesma já explorada em outros trabalhos do grupo de pesquisa. Em um segundo estágio, a pesquisa foi desenvolvida em conjunto com os alunos da CEM 01, por meio de um workshop, onde os mesmos desenvolveram maquetes com o intuito de introduzir alternativas bioclimáticas a escola, a fim de melhorar os níveis de temperatura interna dos ambientes e conseqüentemente contribuir para o conforto térmico. Os modelos criados pelos estudantes foram utilizados como base para a pesquisa, que se desenvolveu com simulação dos cenários criados no software EnergyPlus através da plataforma DesignBuilder. Para facilitar o entendimento destes estágios do procedimento metodológico, definem-se três momentos: estudos anteriores; workshop e modelagem; e simulação.

### Estudos anteriores

Destaca-se como importante para a inicialização da pesquisa o conhecimento de dois outros trabalhos que abordassem sobre o mesmo tema. Tomamos como base para os estudos o trabalho em andamento realizado por Abner Calixter (2018-atual), com o tema Estruturas verdes para a diminuição do calor em escolas públicas do Distrito Federal. Esse trabalho teve início no Centro de Ensino de São Sebastião, onde foi estudado as temperaturas térmicas atuais da escola e a partir disso a criação de um modelo com estruturas verdes e o plantio de novas espécies vegetais para combater os altos níveis de calor do ambiente escolar.

O projeto de extensão Escolas Bioclimáticas também auxiliou a pesquisa ao demonstrar a padronização que ocorre nas escolas públicas do Distrito Federal ao realizar o mesmo estudo no Centro de Ensino Fundamental (CEF) - 04 de Paranoá, outra região periférica de Brasília. Esse projeto proporcionou o contato com os usuários da escola a partir da realização de oficinas, nas quais estudantes da Universidade de Brasília e estudantes da escola do Paranoá debatiam sobre as precariedade que o colégio sofria em relação ao conforto térmico e as soluções que poderiam ser realizadas para a melhoria no conforto interno das áreas de estudos e vivência dos estudantes.

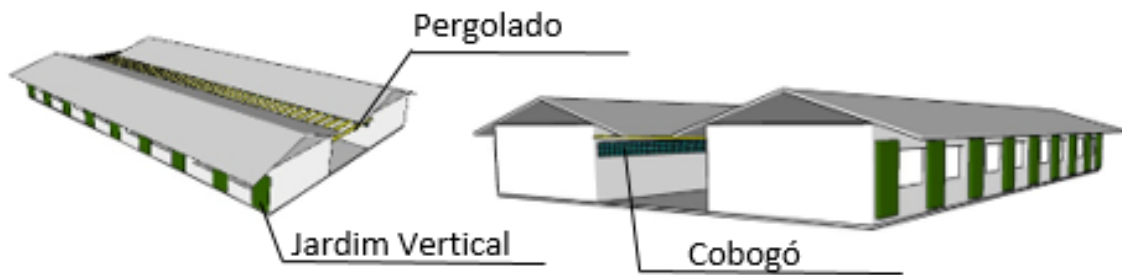
### Workshop e modelagem

Em um primeiro momento, foi realizado uma visita a escola para averiguar a situação da mesma e observar seus pontos a serem melhorados. A fim de nos informar mais sobre a opinião dos usuário foi realizado um workshop com uma turma de alunos da escola. Os alunos foram divididos em 5 grupos com 6 a 7 integrantes cada. A oficina foi iniciada de forma a introduzir os objetivos e incentivar o pensamento e questionamento sobre o conforto térmico da escola, apresentando problemas e possíveis soluções para a melhoria dos ambientes de estudo. Após o debate com os alunos foi proposto que os mesmo desenvolvessem suas ideias em uma maquete que apresentasse alternativas para melhorias do conforto térmico da escola.

Ao final cada grupo apresentou sua respectiva proposta de mecanismos que poderiam ser aplicados na escola para obtenção de um espaço mais confortável ao aprendizado.

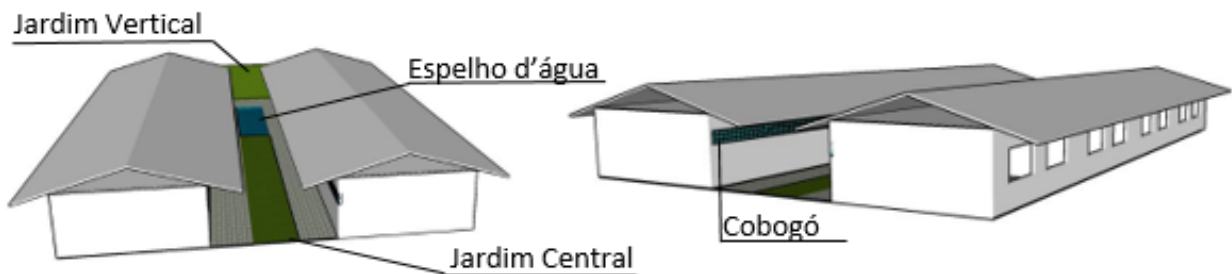
O primeiro grupo propôs a adição de vegetação contornando os blocos de sala de aula, a utilização de cobogós nas paredes com acesso ao pátio e a inclusão de jardim vertical nas paredes externas. Além disso, o grupo criou a alternativa de acréscimo de pergolado no pátio central para reduzir o sol que incide diretamente sobre eles durante o intervalo. A partir do modelo criado pelos alunos, realizamos uma maquete eletrônica demonstrativa para melhor visualização dos equipamentos proposto pelos alunos. Nomeamos o modelo como Cenário 1 para posteriores análises.

Figura 1. Maquete eletrônica do cenário 1. Fonte: Autores, 2018



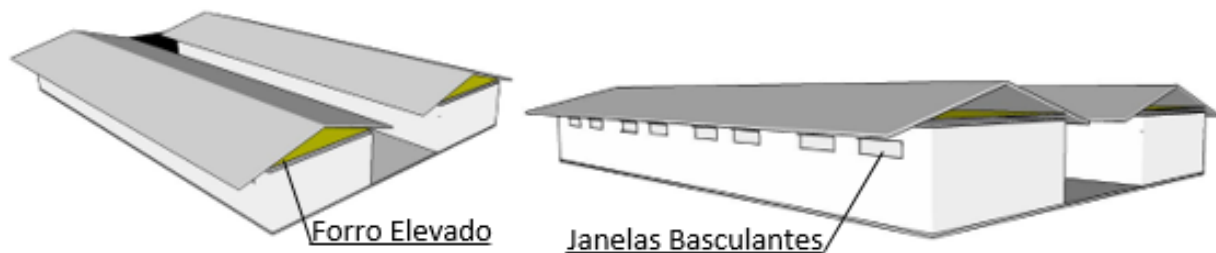
A segunda proposta desenvolvida adicionou ao espaço escolar um jardim e um espelho d'água no pátio central. Os alunos também sugeriram a introdução de cobogós nas paredes com frente para pátio central além do acréscimo de um jardim vertical. E para proporcionar conforto nas áreas externas da edificação colocaram vegetação circundando a escola. O mesmo processo de criação de um modelo tridimensional eletrônico foi elaborado e nomeado Cenário 2.

Figura 2. Maquete eletrônica do cenário 2. Fonte: Autores, 2018



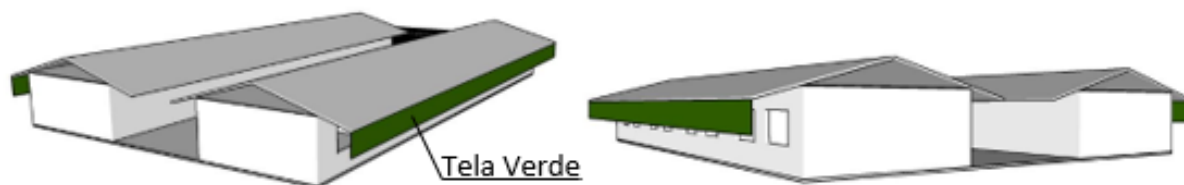
O terceiro grupo de alunos teve como proposta substituir as janelas grandes das salas de aula por janelas basculantes, com o intuito de diminuir a incidência direta do sol no ambiente. Além disso, o grupo colocou como uma alternativa o forro elevado e a adição de vegetação. Uma maquete eletrônica foi executada e nomeada Cenário 3.

Figura 3. Maquete eletrônica do cenário 3. Fonte: Autores, 2018



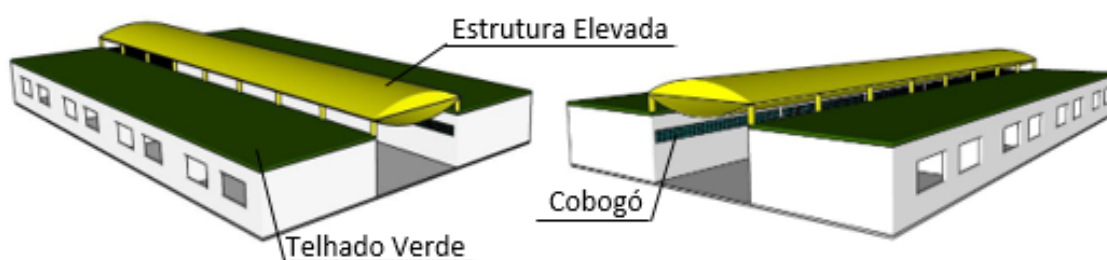
O quarto grupo de alunos propôs a adição de vegetação ao redor da escola e adição de uma tela de proteção verde nas janelas das salas de aula, o que diminuiria a incidência da luz solar direta. A maquete eletrônica realizada foi nomeada Cenário 4.

Figura 4. Maquete eletrônica do cenário 4. Fonte: Autores, 2018



A maquete do Cenário 5 foi elaborada de acordo com as propostas geradas pelo quinto grupo de alunos da oficina. Nesse modelo foi adicionado um telhado verde sobre os blocos de sala de aula e vegetação circundando a escola. Os alunos também tiveram a ideia de adicionar cobogós nas paredes com acesso ao pátio central e uma estrutura elevada que cobre o pátio dos raios diretos, mas permite que ainda entre luz natural difusa e ventilação natural.

Figura 5. Maquete eletrônica do cenário 5. Fonte: Autores, 2018



### Simulação computacional

Após a montagem dos cenários no workshop, inicia-se a fase de simulações dos cenários obtidos. As propostas apresentadas no tópico workshop são redesenhadas e simuladas no DesignBuilder, interface gráfica para a simulação térmica dinâmica por meio do software EnergyPlus 6.0. No programa, com auxílio da plataforma de modelação tridimensional, e por meio de menus, é possível informar os dados e características das edificações a serem analisadas.

Primeiramente, cria-se um modelo tridimensional do centro educacional no seu estado atual, colocando os materiais originais e todos os dados climáticos da cidade de Brasília, Brasil, a fim de obter verossimilhança com a realidade do modelo construído. Essa simulação é nomeada Cenário 0, representando o cenário original e atual da escola. Em seguida são simulados todos os cenários criados e exemplificados no tópico workshop. As alterações propostas em cada modelo é reproduzida, e assim como na simulação do cenário 0, são empregados os dados de localização e fuso horário da cidade do material de estudo.

Os dados simulados pelo programa são dispostos em uma tabela, que é organizada em um software editor de planilhas para retirada dos dados necessários para realização da pesquisa. As informações utilizadas para análises e estudos foram os resultados de temperatura operativa e temperatura externa de bulbo seco. Como parâmetro adotado, o ambiente melhora o seu conforto térmico quando a temperatura neutra (TN) resulta, a partir do cálculo:  $\text{Temperatura do Ar} \times 0,314 + 17,6$  o C, em um resultado menor que a temperatura operativa, mostrando um resfriamento do ambiente.

### Resultados

A partir dos estudos anteriores analisados, foi possível verificar a necessidade de dados de simulação para concretização dos resultados que dispositivos bioclimáticos propiciam nos ambiente escolares em relação ao conforto térmico. Através dos estudos, foi possível também adquirir contato com o centro de ensino selecionado para pesquisa e coletar informações necessárias para a concretização e criação dos modelos para pesquisa.

O workshop realizado com os alunos da CEM 01 de São Sebastião propiciou as informações sobre as reais necessidades que a escola sofria e por comentários dos próprios usuários foi possível adquirir o conhecimento das áreas mais críticas do edifício. Desse modo a escolha de trabalhar, junto aos alunos, um modelo tridimensional das salas de aula tornou possível a criação de cenários e então análises dos dispositivos bioclimáticos que poderia trazer maior conforto nas áreas de estudo, sendo essa etapa fundamental para a elaboração dos modelos computacionais a serem simulados.

Os dados adquiridos a partir da plataforma de planilhas foram divididos em turnos equivalentes às horas de funcionamento da escola, sendo o turno matutino de 7 horas da manhã às 12 horas da tarde, o turno vespertino das 13 horas às 18 horas da noite e o turno noturno das 19 horas às 23h horas da noite. Os dados também foram separados em conformidade com os dias de funcionamento da escola, de segunda-feira a sexta-feira.

Comparando-se o cenário 0 (realidade atual) aos cenários criados, foi possível observar os seguintes resultados de percentual de horas confortáveis:

O turno matutino, apresentou melhoria de 12% no cenário 1, de 16% no cenário 3 e de 12% no cenário 5. Nos cenários 2 e 4 o resultado se manteve o mesmo do original.

Já no turno vespertino, o cenário 1 obteve melhoria de 16%, o cenário 3 de 28% e o cenário 5 de 27%. O cenário 4 não apresentou melhorias, mantendo o mesmo resultado do cenário 0. Entretanto, o cenário 2 demonstrou uma redução do conforto em relação ao resultado de 1% do cenário original.

O último turno de funcionamento da escola, teve melhorias apenas nos cenários 3 e 5, o primeiro em 8% e o segundo em 1%. Os cenários 2 e 4 se mantiveram em relação aos resultados enquanto o cenário 1 apresentou redução de sua eficiência de horas confortáveis em 1%.

**Tabela 1.** Planilha de resultados de cenários analisados separados por turno. Autores, 2018.

|            | Cenário 0 | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 | Cenário 4 | Cenário 5 |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Matutino   | 80%       | 92%       | 80%       | 96%       | 80%       | 92%       |
| Vespertino | 59%       | 75%       | 58%       | 87%       | 59%       | 86%       |
| Noturno    | 1%        | 0%        | 1%        | 9%        | 1%        | 2%        |

A tabela 1 apresenta os cenários e suas respectivas horas de conforto de acordo com o turno simulado. O cenário 0, ou seja o cenário original de como é a escola atualmente, apresenta 80% de horas confortáveis no turno matutino, 59% de horas confortáveis no turno vespertino e 1% de conforto durante o período noturno. Esses dados foram usados para comparação das horas confortáveis adquiridas nos outros cenários. O resultado de porcentagem em outro cenário criado é diminuído pela porcentagem do cenário 0 e assim obtido a resposta da quantidade de horas confortáveis a mais que os dispositivos bioclimáticos utilizados ocasionam no modelo.

É possível observar a partir da tabela que o cenário que possibilitou a maior diminuição da temperatura no interior dos blocos de sala de aula foi o cenário 3, com alteração das janelas atuais para basculantes, adição de forro elevado e vegetação circundando a escola.

## Discussão e Conclusão

A padronização de projetos de edifícios escolares públicos limita o potencial de conforto térmico de seus usuários em diferentes turnos do dia. Desse modo, apresenta-se a importância da adequação deste projeto escolar em relação ao conforto térmico dos ambientes. Sendo assim, apresenta-se a relevância da inserção da arquitetura bioclimática em

projetos de edifícios de instituições de ensino. Desde a concepção, deve ser considerado os aspectos de habitabilidade da edificação, além da localização e predominância de clima da cidade a ser implantada.

O momento da visita in loco foi importante pois, por meio do contato direto com os frequentadores da escola, foi possível conhecer suas queixas quanto às temperaturas elevadas e o baixo nível de desconforto térmico dentro das salas de aula. O momento workshop foi fundamental para qualificar os resultados das simulações, pois, a fim de incentivar a aprendizagem sobre dispositivos bioclimáticos e seus possíveis efeitos, a oficina realizada com os alunos mostrou a necessidade do estudo de um plano de necessidades antes de realizar as modificações de um projeto para que o mesmo atenda aos trabalhos realizados no interior do edifício, além de um conhecimento e discussão mais aprofundados dos materiais a serem utilizados na intervenção. O estudo de caso da escola CEM 01 de São Sebastião mostra um dos padrões seguidos no Brasil para edificações escolares. A ineficiência térmica apresentada no edifício a partir de resultados de simulação computacional, mostra a importância da aplicação de dispositivos bioclimáticos no edifício da escola. A partir desses resultados foi possível comparar os dados obtidos das simulações dos cenários propostos com a adição de dispositivos bioclimáticos específicos. Neste sentido, conclui-se que a intervenção responsável pelo ganho de 28% de conforto deve ser implementada pela escola. Os resultados obtidos baseados em medidas de evidência visam informar políticas públicas que a inserção de elementos bioclimáticos alteram e melhoram significativamente o percentual de horas confortáveis dentro dos edifícios escolares, podendo assim contribuir para a produtividade e rendimentos dos funcionários e alunos que frequentam o ambiente escolar.

## Agradecimentos

Agradecemos à Fundação Universidade de Brasília (FUB) pelo patrocínio e incentivo ao Programa de Iniciação Científica (ProIC), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas concedidas e ao grupo Climate Adaptive Just Urbanism (CAJU Initiative) pelos dados fornecidos.

## Referências

- Distrito Federal, Administração Regional de São Sebastião. Obtido em: <http://www.saosebastiao.df.gov.br/category/sobre-a-ra/conheca-a-ra/>
- Natural Works, Design Builder Software. DesignBuilder Introdução. Obtido em <http://natural-works.com/db/introducao/110-designbuilder>
- DE SOUZA, A. P. A.; (2005). Uso de energia em edifícios: estudo de caso de escolas municipais e estaduais de Itabira, Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Ecker, V. D. (2012) Habitação residencial: a integração à paisagem local com base em estratégias paisagísticas mais sustentáveis. In: XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Juiz de Fora, Minas Gerais.
- Gauzin-Muller,, D. (2011). Arquitetura ecológica. Editora SENAC.
- Godoi, G. (2010) Conforto térmico nas edificações escolares públicas: análise da implantação do projeto padrão 023 da rede pública de ensino do estado do Paraná. Monografia de especialização.
- Grasso, R., Pilar A.; Ghisi, E.; Lamberts, R. (1998) Avaliação energética do edifício sede da Telesc: retrofit do sistema de iluminação e simulação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO.
- i + i consulting, SILVESTRE, I., MEDINA, I. (2016). Estratégias ambientais para edifícios de escritórios.
- Initiative, C. (2017). Refresca São Paulo. Obtido em: <https://www.cajuinitiative.org/refresca-so-paulo->
- Initiative, C. (2018) Resilient School Project in Brasilia. Obtido em: <https://www.cajuinitiative.org/resilient-school-project-in-brasili>
- Kuhn, E. A. (2006). Avaliação da sustentabilidade ambiental do protótipo de habitação de interesse social Alvorada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- Lamberts, R.; Dutra, L.; Pereira, F.(1997). Eficiência energética na arquitetura. São Paulo: PW Editores.
- Lamberts, R.; Ghisi, Enedir; PAPST, Ana Lúcia (2000). Apostila – Desempenho térmico de edificações (Consumo de eletricidade em edificações). LabEEE. Florianópolis.
- Santana, M. V. (2006). Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis - SC. Florianópolis. SC.
- Solano, R. B. P. (2008) A importância da arquitetura sustentável na redução do impacto ambiental.
- Westphal, F. S.; Lamberts, R. (2000) Proposta de Melhoria na Eficiência Energética de um Edifício Comercial. In: VIII Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, Salvador, Bahia.

# A influência do comportamento do usuário em habitações de interesse social em clima quente e úmido.

The influence of occupant's behaviour on social housing in a hot-humid climate.

## Andreia Cardoso de Oliveira

Filiación: Universidade Federal da Paraíba

Dirección: Via Expressa Padre Zé, 643-923 - Castelo Branco, João Pessoa - PB, 58033-455

Correo: andreiaoliveira.arq@gmail.com

## Solange Maria Leder

Filiación: Universidade Federal da Paraíba

Dirección: Via Expressa Padre Zé, 643-923 - Castelo Branco, João Pessoa - PB, 58033-455

Correo: solangeleder@yahoo.com.br

## Celina Pinto Leão

Filiación: Universidade do Minho

Dirección: Campus de Gualtar 4710-057 Braga Portugal

Correo: cpl@dps.uminho.pt

**Manuscript Code:** 039

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

### Resumo em português

Este artigo trata de uma investigação sobre as ações dos ocupantes na promoção do conforto térmico e padrões de uso em habitações de interesse social no clima quente e úmido. Para uma previsão mais realista sobre o desempenho térmico do edifício, destaca-se a importância de incluir ações de interações dos ocupantes com a habitação. Para identificar este comportamento, uma avaliação das rotinas, práticas e hábitos em situações reais servirá como parâmetro inicial para a construção dos cenários que representam as ações dos usuários nos modelos de predição. O método compreende as seguintes etapas: a) estudo de campo, com aplicação de questionários e levantamento da tipologia habitacional, b) tratamento dos dados e análise estatística para identificar cenários que representem padrões de uso e ocupação de maior frequência, por análise de Cluster. Foi utilizado o software SPSS Statistics 24.0. O estudo foi realizado em dois conjuntos habitacionais em clima quente e úmido, João Pessoa, nordeste do Brasil. Foram aplicados 79 questionários entre os meses de fevereiro a julho de 2017. Foram identificados 3 tipos de famílias mais representativas, com padrões de ocupação semelhantes determinados principalmente pelos horários de trabalho dos moradores. Os resultados apontam forte correlação entre a abertura das janelas e a segurança. O fator segurança foi o indicador que mais influenciou o horário de fechar as aberturas, mesmo quando havia necessidade de mantê-la aberta para promover ventilação natural. Percebe-se uma inversão em algumas ações de adaptabilidade esperadas, tais como, o uso de ventilação mecânica no período noturno, quando as condições de temperatura externa estão mais baixas, porque as portas e janelas estão totalmente fechadas. O desempenho térmico das edificações analisadas é fortemente afetado por alterações nas edificações, realizadas após a ocupação, como a inclusão de grades de segurança nas aberturas e a ocupação dos recuos laterais na ampliação da área construída, essas adaptações reduzem a ventilação natural.

**Palavras chave:** Comportamento dos usuarios; questionário; modelos de simulação.

### Abstract in English

This research deals with an investigation into the actions of the occupants in the promotion of thermal comfort and patterns of use in social housing in the hot and humid climate. For a more realistic prediction about the thermal performance of the building, it is important to include actions of interactions of the occupants with the dwelling. To identify this behaviour, an evaluation of the routines, practices and habits in real situations will serve as the initial parameter for the construction of the scenarios that represent the actions of the users in the prediction models. The method comprises the following steps: a) field study, with application of questionnaires and survey of housing typology, b) data treatment and statistical analysis to identify scenarios that represent patterns of use and occupation of higher frequency, by Cluster analysis. SPSS Statistics 24.0 software was used. The study was carried out in two housing estates in hot and humid climate, João Pessoa, northeastern Brazil. A total of 79 questionnaires were applied between February and July 2017. Three types of representative families were identified, with similar occupation patterns determined mainly by the working hours of the residents. The results show a strong correlation between opening windows and security. The safety factor was the indicator that most influenced the opening hours, even when there was a need to keep it open to promote natural ventilation. There is a reversal in some expected adaptive actions, such as the use of mechanical ventilation at night, when external temperature conditions are lower because the doors and windows are fully closed. The thermal performance of the analyzed buildings is strongly affected by alterations in the buildings made after the occupation, such as the inclusion of safety grids in the openings and the occupation of the lateral recesses in the enlargement of the built area, these adaptations reduce the natural ventilation.

**Keywords in English:** Occupant's behaviour; survey; simulation model.

Estudos que procuram identificar quais são os parâmetros que mais influenciam o desempenho térmico de habitações têm sido desenvolvidos há décadas, principalmente em edifícios de escritórios, em paralelo com discussões sobre a influência dos ocupantes nas condições de conforto no interior dos edifícios. Além disso, uma parte menor das pesquisas desenvolvidas é voltada às particularidades do desempenho térmico em edifícios residenciais, assim é o caso da presente pesquisa, que estuda o desempenho das habitações ventiladas naturalmente.

Dentro do contexto das ações dos ocupantes sobre o conforto no interior do edifício, diversas publicações têm demonstrado a variabilidade de resultados em função das ações dos ocupantes entre as medições dos modelos reais e os dados gerados a partir dos modelos desenvolvidos para o método de avaliação de desempenho por simulação (ROETZEL et al., 2010; FABI et al., 2012; ZANG E BARRET, 2012).

Sorgato (2015) comenta que a compreensão do comportamento dos usuários é um parâmetro importante para a concepção e a avaliação do desempenho das edificações ventiladas naturalmente não sendo recomendado generalizar o comportamento do usuário, principalmente em condições climáticas diferentes. Diversos estudos foram publicados baseados em modelos estocásticos do comportamento dos ocupantes em relação ao controle do ambiente interno. No entanto, para obter uma previsão adequada sobre o desempenho térmico do edifício, é necessário incluir modelos realistas de interações dos ocupantes com os controles de aberturas, termostatos e proteção solar, entre outros (ADERSEN, FABI E CORGNATI, 2016).

Apesar de uma determinada habitação demonstrar um bom desempenho pela correta proporção de aberturas na fachada, o uso da ventilação natural pode ser afetado por estas aberturas permanecerem, a maior parte do tempo, fechadas. Influências externas como a presença ou não de grade nas janelas ou de fechamento do lote, a proximidade com edificações vizinhas e questões relativas à privacidade e segurança podem alterar esse desempenho em condições reais. Influências como esta podem ocorrer em diferentes cenários de comportamento do usuário e no resultado da sua interação com o edifício.

Outra questão que deve ser observada é a possibilidade de existência de variações nas rotinas dos ocupantes. Assim, é possível conceber uma família tradicional com alguns moradores que permanecem em casa e, portanto, controlam as trocas térmicas ao longo do dia; bem como uma família contemporânea, em que todos trabalham e estudam o dia todo, permanecendo em casa somente à noite. Neste cenário, a habitação passa o dia sem interação, resultando em uma carga térmica totalmente distinta do cenário anterior, apesar de possuir o mesmo padrão construtivo. Desta maneira, esta pesquisa tem como objetivo identificar o comportamento de usuários de habitação de interesse social, a partir de uma avaliação das rotinas, práticas e hábitos de diferentes tipos de famílias em um mesmo tipo de edificação, que servirá como parâmetro inicial para inserir este comportamento nos modelos de avaliação de desempenho por método de simulação computacional, afim de obter resultados mais próximos dos reais.

## Estado da arte do problema

Segundo Han et al. (2007), as diferenças encontradas entre os estudos de campo e os modelos preditivos indicam a adaptação das pessoas ao ambiente térmico por meio de ajustes no seu balanço de calor, através de roupas, janelas, ventilador, etc. Os resultados da pesquisa de campo realizada pelos autores com a aplicação de questionários para 110 sujeitos em 26 residências diferentes em três cidades de clima quente e úmido da China. Nessas condições, cerca de 87% dos ocupantes analisados consideraram seus ambientes térmicos aceitáveis. Han et al. (2007) ressaltaram também que mais de 60% dos ocupantes de residências com ar-condicionado consideraram seu ambiente aceitável, e essa taxa cai para 20% entre os ocupantes sem ar-condicionado.

Os autores destacam ainda que os efeitos dos ajustes comportamentais, fisiológicos e psicológicos podem ter sido negligenciados quando os sujeitos responderam, o que justificaria as diferenças entre os valores observados e previstos, atribuídos ao comportamento do usuário a longo prazo, como preferência por janelas abertas ou fechadas, fisiologia e psicologia (HAN et al., 2007). A importância de avaliar o comportamento do usuário em circunstâncias distintas de clima e localização é confirmada por Roetzel et al. (2010), ao comentarem sobre um dos fatores que afetam a relação entre o comportamento dos usuários e o desempenho térmico dos edifícios. Em edifícios ventilados naturalmente, as janelas são abertas para deixar entrar o ar fresco quando a temperatura externa é mais baixa e evita o aumento de temperatura interna. Ao analisar a literatura a cerca deste tema, Fabi et al. (2012) comentam que o comportamento dos ocupantes pode ser influenciado por três causas principais: causas externas (temperatura do ar,

velocidade do vento); causas individuais e propriedades de construção (propriedades térmicas, dispositivos de aquecimento). Para Fabi et al. (2012), a temperatura externa vinha sendo considerada a maior responsável pela influência na interação entre os ocupantes e o ambiente construído, sendo este parâmetro classificado como 'fatores externos'. As causas individuais foram divididas em cinco grupos: fatores ambientais, fatores contextuais, fatores psicológicos, fatores fisiológicos e fatores sociais. Alguns exemplos de fatores ambientais são a temperatura, umidade, velocidade do ar, ruído, iluminação e odor. Já exemplos de fatores contextuais são: o isolamento de edifícios, orientação de fachadas, tipo de sistema de aquecimento, tipo de termostato (por exemplo, manual ou programável) etc. (FABI et al., 2012; DA YAN et al., 2015).

Da Yan et al. (2015) confirmaram que pesquisas realizadas sobre o comportamento dos usuários indicaram que fatores contextuais influenciaram no desempenho térmico dos edifícios. O principal motivo para a opção pelas janelas abertas no inverno era a qualidade interna do ar, enquanto no verão, o principal motivo para a ação de fechamento da janela era o incômodo provocado pelo barulho do lado de fora. A importância de considerar que o uso dos ocupantes pode influenciar os resultados das janelas em modelos de simulação foi mencionada por Da Yan et al. (2015), ao destacarem que, em modelos de simulação, as janelas são definidas com o máximo da área de abertura para maior aproveitamento da luz do dia. Entretanto, janelas muito grandes podem levar os ocupantes a fecharem as persianas e optarem pela iluminação artificial em função do excesso de brilho.

Hong et al. (2017), apresentam dez perguntas sobre conceitos, aplicações e metodologias do comportamento dos ocupantes sobre a eficiência energética, para reduzir o uso de energia em edifícios. As primeiras três perguntas estão relacionadas a técnicas de monitoramento para quantificar impactos do comportamento humano sobre o desempenho térmico da construção. As respostas à questão 1 (Quais são os comportamentos dos ocupantes que influenciam o desempenho energético dos edifícios?) foram agrupadas em duas categorias - ações adaptativas e ações não-adaptativas – levando-se em conta o conceito de conforto adaptativo. Hong et al. (2017) destacam que as principais ações para adaptar o ambiente interno às suas necessidades ou preferências dos ocupantes são: abrir/fechar janelas, abaixar persianas, ajustar termostatos, ligar/desligar a iluminação, ajustar roupas e mover-se entre os ambientes. Já as ações não adaptativas estão relacionadas a operar equipamentos adicionais elétricos (por exemplo, aquecedores pessoais, ventiladores e sistemas elétricos de aquecimento e resfriamento de espaços).

Na questão 2 (Como o comportamento dos ocupantes influencia desempenho energético da construção?), Hong et al. (2017) comentam que, em algumas ações, como abrir uma janela, por exemplo, o usuário altera as condições ambientais internas, resultando em um aumento no consumo de energia devido a um aumento na taxa de fluxo de ar de ventilação. Já na questão 3 (Como podemos medir o comportamento dos ocupantes para quantificar seus impactos no desempenho energético da construção?), os autores ressaltam que o comportamento dos ocupantes pode ser medido por métodos de sensoriamento físico ou não-físico. Em edifícios comerciais verifica-se a ocupação (presença e movimento), a interação com o envelope do edifício (janelas, persianas), e o uso de sistemas de controle (HVAC, sistemas de iluminação). No método de observação, verificam-se os estados das janelas (abertas ou fechadas) em relação às condições ambientais do interior e do exterior.

## Metodologia

O método compreende duas etapas: a) estudo de campo, com aplicação de questionários e caracterização dos modelos. Para uma melhor compreensão onde foi realizado o estudo de campo, foram realizados levantamentos das unidades habitacionais nas duas áreas que foram utilizadas neste estudo. b) tratamento dos dados e análise pelo método de Estatística Descritiva, análise pelo método de Referência Cruzada e análise pelo método de Cluster.

### Caracterização dos modelos

Inicialmente, foi aplicado um estudo piloto, realizado em fevereiro de 2017, na cidade de João Pessoa - Paraíba, nordeste do Brasil. Após aprimoramento dos questionários e otimização dos procedimentos a serem adotados, o processo de levantamento de dados foi iniciado. Os dados foram coletados em visitas realizadas a cada unidade habitacional, entretanto foi encontrada muita resistência dos moradores, além da identificação de risco aos entrevistadores decorrentes de problemas sócio-econômicos enfrentado pela comunidade em estudo, a pesquisa na primeira área foi concluído com uma amostra 36 questionários aplicados. Assim, optou-se por mudar o objeto de estudo para um conjunto mais acessível. A segunda área foi concluída com uma amostra de 43 questionários, totalizando 79.



O tipo original da unidade habitacional autônoma (UH) do conjunto 1, possui 37,22 m<sup>2</sup>, com os seguintes ambientes: 1 sala, 1 cozinha, 1 banheiro e 2 quartos. A edificação é térrea e possui a cobertura em duas águas, e caracteriza-se como edificação ventilada naturalmente. A unidade habitacional (UH) do Conjunto 2, que será tratado como caso base, possui 35,27 m<sup>2</sup>, com os seguintes ambientes: 1 sala, 1 terraço, 1 cozinha, 1 banheiro e 1 quarto. Da mesma forma, também se caracteriza como uma edificação térrea, com telhado em duas águas e ventilada naturalmente. Nos dois conjuntos, os lotes são de 10m x 20m, as ruas possuem 8,00m de largura e as calçadas possuem 2,00m de largura.



Figura 19. Esquema do caso base 1. Preparado pelos autores, 2018.



Figura 2. Esquema do caso base 2. Preparado pelos autores, 2018.

### Cenários dos usuários

O questionário foi dividido em cinco grupos por tipo de questão. O primeiro grupo refere-se ao perfil do usuário, e compreende as questões 01, 02, 22, 23 e 24. O grupo 02 reúne as questões de sensação térmica, com escala para as questões 03 e 04, baseadas em índices de conforto térmico. As questões 05 a 10, e 25 estão relacionadas aos motivos que os usuários controlam a abertura e o fechamento das portas e janelas. As questões do grupo 04 auxiliam no entendimento das cargas internas geradas relacionadas a usos e equipamentos e as questões do grupo 05 definem os horários e rotinas dos ocupantes.

### Análise dos dados

A análise dos dados foi desenvolvida com o auxílio do software SPSS Statistics 24.0, e ocorreu em 3 etapas. A primeira etapa refere-se a uma avaliação inicial, onde foi adotado o uso de Estatística Descritiva para entender o comportamento das variáveis estudadas. A segunda etapa foi Referência Cruzada, quando se pôde comparar respostas de questões distintas que possuíam correlação. Na terceira etapa, os dados foram analisados pelo método de agrupamento, ou Análise de Cluster. O parâmetro base para classificação dos grupos foi o número de moradores por família, permitindo identificar os diferentes tipos de família encontrados nos dois conjuntos habitacionais para, em seguida, identificar as diferenças entre os hábitos e rotinas de cada um deles.

Na fase de aplicação da Estatística Descritiva, as questões foram divididas em quatro grupos por método aplicado. As questões com respostas abertas relacionadas ao perfil do entrevistado, foram agrupadas no grupo 1 e as respostas foram codificadas. O grupo 2 é formado por questões de múltipla escolha, que foram organizadas separadamente e analisadas em conjunto, considerando sim (1) ou não (0) para as opções assinaladas. O grupo 3 abrange as questões abertas e o último grupo reúne as questões objetivas. Em seguida, foi aplicado o método de Referência Cruzada no programa SPSS. O método identifica a influência entre duas questões ao mesmo tempo, gerando como dados de saída: tabelas de contagem e gráficos de barra, entre outros.

## Resultados

As questões 01, 02, 22 e 23 estão relacionadas com o perfil dos moradores e foram analisadas por Estatística Descritiva. Ao observar o gráfico de barra gerado com os valores da questão 01, verificamos que estes estão bem distribuídos entre as respostas 2 (1 a 5 anos – 27,85%), 3 (6 a 10 anos – 20,25%), 4 (11 a 15 anos – 17,72%) e 5 (16 a 20 anos – 18,99%). A questão 02 indicou que a maior parte dos moradores nasceram em João Pessoa ou no interior da Paraíba, totalizando 91% dos dados somados. A questão 22 demonstrou que 67,1% dos entrevistados eram mulheres, enquanto 32,9% eram homens. Na questão 23, observa-se que a idade dos entrevistados variou entre 20 e 60 anos, com maior frequência entre 20 e 29 anos. Percebe-se que 50% das respostas estão entre 20 e 50 anos, com a mediana, tanto masculina quanto feminina, na faixa dos 30 a 39 anos. Outro fator que é importante ressaltar é que as mulheres têm mais respostas acima dos 40 anos. A questão 24 indica a quantidade de moradores por unidade

habitacional. Percebe-se que o gráfico por setor mostra que 30,3% das respostas indicam 02 moradores por moradia. O segundo resultado mais relevante foram 4 moradores por unidade habitacional, seguido de composições de famílias com 3 e 5 moradores.

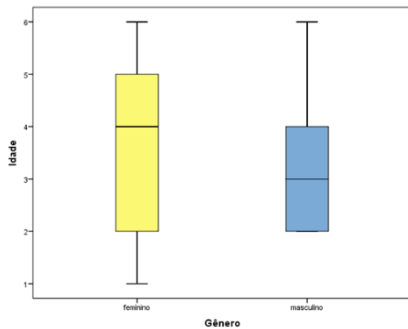


Figura 3. Gráfico de boxplot – gênero x idade. Preparado pelos autores, 2018.

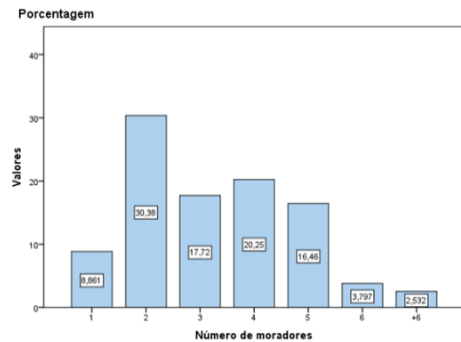


Figura 4. Número de moradores. Preparado pelos autores, 2018.

A questão 08 refere-se ao motivo de fechar as janelas. A maior parte dos ocupantes indicou mais de uma resposta. As opções mais escolhidas foram: quando vai dormir e ao sair de casa. A questão 09 possui as mesmas alternativas para identificar em quais situações as portas da sala são fechadas. Nesta questão, a maior parte dos entrevistados escolheu a opção (ao sair de casa), com 31,4% das respostas. Esta questão também foi analisada a partir da tabela de número de casos associada ao gráfico de barras por porcentagem.

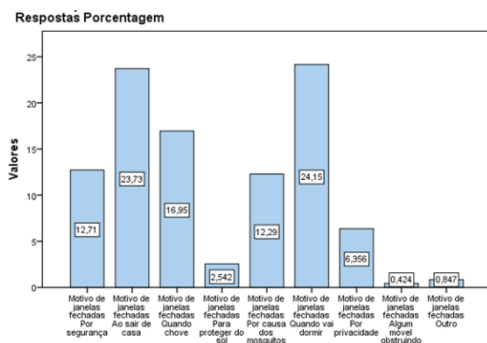


Figura 5. Questão 8 – motivo de fechar as janelas. Preparado pelos autores, 2018.

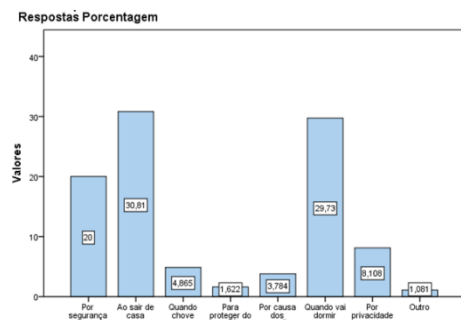


Figura 6. Questão 9 – motivo de fechar as portas. Preparado pelos autores, 2018.

No grupo de questões abertas, a questão 05 era relativo ao horário que as janelas ficam abertas resultou em quinze respostas diferentes, com apenas quatro entre as respostas que obtiveram mais de 3 repetições. A partir da tabela de número de casos, verifica-se que 70,9% dos casos informou que mantem as janelas abertas o dia todo. Sobre o horário que as portas estão abertas, a questão 06 indicou que doze respostas diferentes foram relatadas. A resposta 02 (o dia todo) resultou em 63% dos casos, entretanto a segunda resposta mais frequente foi o inverso: 'nunca, sempre fechada', com 16% das respostas. Apenas mais uma resposta 'à tarde' recebeu mais de dois casos.

Tabela 13. Horário das janelas abertas. Preparado pelos autores, 2018.

|                     | Frequência | Porcentagem |
|---------------------|------------|-------------|
| 8hs-16hs            | 1          | 1,3         |
| <b>dia todo</b>     | <b>56</b>  | <b>70,9</b> |
| 6hs-21hs            | 1          | 1,3         |
| 7hs-22hs            | 1          | 1,3         |
| 7hs-15hs            | 1          | 1,3         |
| sempre fechada      | 4          | 5,1         |
| aberta 24hs         | 2          | 2,5         |
| 6hs-23hs            | 1          | 1,3         |
| 7hs-19hs            | 1          | 1,3         |
| 7hs-17hs            | 3          | 3,8         |
| À tarde             | 1          | 1,3         |
| À noite             | 1          | 1,3         |
| 6hs-7hs e 22hs-24hs | 2          | 2,5         |

Tabela 14. Horário das portas abertas. Preparado pelos autores, 2018.

|                              | Frequência | Porcentagem |
|------------------------------|------------|-------------|
| dia todo até 00hs            | 1          | 1,3         |
| <b>dia todo</b>              | <b>50</b>  | <b>63,3</b> |
| 6hs-21hs                     | 1          | 1,3         |
| 7hs-21hs                     | 2          | 2,5         |
| <b>nunca, sempre fechada</b> | <b>13</b>  | <b>16,5</b> |
| 6hs-22hs                     | 2          | 2,5         |
| 7hs-00hs                     | 1          | 1,3         |
| 7hs-22hs                     | 1          | 1,3         |
| À tarde                      | 5          | 6,3         |
| 6hs-7hs e 22hs-00hs          | 1          | 1,3         |
| 7hs-20hs                     | 1          | 1,3         |
| Até 17hs                     | 1          | 1,3         |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| De manhã | 3 | 3,8 |
| 8hs-17hs | 1 | 1,3 |

Sobre o período de uso de ventilador e sua frequência. A questão 11 foi observada a partir de sua frequência, gráficos de boxplot e barra, indicando que 72% dos entrevistados responderam que usam o ventilador à noite. Quanto à frequência de uso, foram observados que 54% dos casos usam o ventilador todos os dias. Considerando a relevância da carga interna produzida na cozinha, a questão 14 trata sobre o uso do fogão. A partir do gráfico de Boxplot, a mediana indicou a resposta 1 (durante a semana). Ao analisar a frequência, foram observadas respostas bem distribuídas entre as opções, com apenas 53% dos entrevistados que cozinham durante a semana e 26% cozinham todos os dias.

### Análise Referência Cruzada

Ao aplicar o método de Referência Cruzada entre o horário que o morador sai para trabalhar e a quantidade de moradores por unidade, percebe-se que a maior parte dos usuários saem às 07hs, para as unidades com duas pessoas, quatro pessoas e com cinco pessoas por unidade. O cruzamento entre o horário que os moradores 3 e os moradores 4 saem para o trabalho e a quantidade de moradores por unidade indica uma concentração maior por horário, com exceção de uma pequena quantidade que sai às 7hs, o restante não indicou horário, portanto são ocupantes que não trabalham, sendo jovens na maior parte dos casos. Entre as famílias com três moradores, a maioria dos moradores que responderam os questionários não trabalham, seguidos pelos moradores que saem para trabalhar às 07hs da manhã.

A partir da análise dos motivos que refletem na operação das janelas, foram cruzados os dados resultantes da questão aberta, em que os ocupantes poderiam descrever quando as janelas estão abertas livremente, com a questão de múltipla escolha com motivos pré-definidos. O horário que as janelas estão abertas foram analisados nas seguintes alternativas: quando vai dormir, por segurança, ao sair de casa, quando chove, para proteger do sol, por causa dos mosquitos. Já no cruzamento de quem abre as janelas 'o dia todo' com a alternativa – quando vai dormir, pode-se observar que as pessoas que responderam que mantém as janelas abertas o dia todo, também indicaram que fecham as janelas quando vão dormir. Isto é, de 50 ocupantes que responderam que deixam as janelas abertas o dia todo, 46 destas também responderam que fecham as janelas quando vão dormir (92% dos casos). Pode-se concluir que a resposta o dia todo, compreende o despertar/ levantar, em torno de 7h horas da manhã até o momento de recolhimento para dormir, por volta de 22h.

Tabela 15. Referência Cruzada – quando vai dormir. Autores, 2018.

|                             |                     | Quando vai dormir | Total |
|-----------------------------|---------------------|-------------------|-------|
| Horário das janelas abertas | 8hs-17hs            | 1                 | 1     |
|                             | De manhã            | 1                 | 1     |
|                             | 6hs-7hs e 22hs-24hs | 2                 | 2     |
|                             | À tarde             | 1                 | 1     |
|                             | 7hs-17hs            | 2                 | 2     |
|                             | 6hs-23hs            | 1                 | 1     |
|                             | aberta 24hs         | 1                 | 1     |
|                             | 7hs-22hs            | 1                 | 1     |
|                             | 6hs-21hs            | 1                 | 1     |
|                             | dia todo            | 46                | 46    |
| Total                       |                     | 57                | 57    |

Tabela 16. Referência Cruzada – ao sair de casa. Preparado pelos autores, 2018.

|                             |                     | Ao sair de casa | Total |
|-----------------------------|---------------------|-----------------|-------|
| Horário das janelas abertas | 8hs-17hs            | 1               | 1     |
|                             | De manhã            | 1               | 1     |
|                             | 6hs-7hs e 22hs-24hs | 2               | 2     |
|                             | À noite             | 1               | 1     |
|                             | À tarde             | 1               | 1     |
|                             | 7hs-17hs            | 2               | 2     |
|                             | aberta 24hs         | 1               | 1     |
|                             | sempre fechada      | 4               | 4     |
|                             | 7hs-22hs            | 1               | 1     |
|                             | 6hs-21hs            | 1               | 1     |
| dia todo                    | 40                  | 40              |       |
| 8hs-16hs                    | 1                   | 1               |       |
| Total                       |                     | 56              | 56    |

Table 17. Referência Cruzada – Por segurança. Preparado pelos autores, 2018.

|                             |                     | Por segurança | Total |
|-----------------------------|---------------------|---------------|-------|
| Horário das janelas abertas | 8hs-17hs            | 1             | 1     |
|                             | De manhã            | 0             | 1     |
|                             | 6hs-7hs e 22hs-24hs | 1             | 2     |
|                             | À tarde             | 1             | 1     |
|                             | 7hs-17hs            | 0             | 2     |
|                             | 6hs-23hs            | 0             | 1     |

Table 18. Referência Cruzada – Por causa dos mosquitos. Autores, 2018.

|                             |                | Por causa dos mosquitos | Total |
|-----------------------------|----------------|-------------------------|-------|
| Horário das janelas abertas | 8hs-17hs       | 1                       | 1     |
|                             | De manhã       | 2                       | 2     |
|                             | 7hs-17hs       | 3                       | 3     |
|                             | 7hs-19hs       | 1                       | 1     |
|                             | aberta 24hs    | 2                       | 2     |
|                             | sempre fechada | 1                       | 1     |

|             |    |    |
|-------------|----|----|
| aberta 24hs | 0  | 1  |
| 7hs-22hs    | 0  | 1  |
| 6hs-21hs    | 0  | 1  |
| dia todo    | 18 | 46 |
| Total       | 21 | 57 |

|          |    |    |
|----------|----|----|
| 7hs-15hs | 1  | 1  |
| dia todo | 17 | 17 |
| 8hs-16hs | 1  | 1  |
| Total    | 29 | 29 |

A alternativa 'quando chove' foi menos indicada que as alternativas anteriores com 40 respostas. O cruzamento mais relevante continua sendo com a resposta 'o dia todo', com 60% das respostas. Poucos ocupantes escolheram a alternativa 'para proteger do sol', com apenas 6 respostas distribuídas entre 'a tarde', '7hs às 15hs' e 'o dia todo'. Por fim, o cruzamento com a alternativa 'por causa dos mosquitos' indicou a variabilidade de resposta, com 9 entre 15 respostas da questão aberta. É importante observar que os dois moradores que responderam que mantêm as janelas abertas 24h, também responderam que fecham as janelas por causa dos mosquitos, indicando a fragilidade de algumas respostas abertas. A importância de confrontar a mesma informação em duas respostas diferentes nos ajudou a entender a real situação da rotina dos usuários quanto ao controle das aberturas e os motivos que determinam os horários que são estas são operadas pelos ocupantes.

### Análise de Cluster

Ao analisar os dados resultantes do estudo de campo, foram definidos alguns parâmetros iniciais para o agrupamento que permitam compreender a variabilidade de comportamentos e usos presentes nos conjuntos habitacionais estudados. O primeiro parâmetro está associado ao número de moradores por unidade habitacional. Foi observado que a predominância das respostas variou entre famílias com 02 moradores, com 30%, em segundo lugar família com 04 moradores, com 20%, e famílias com 03 moradores, com 17%. Este fator foi decisivo para a definição de 03 grupos que foram analisados segundo as mesmas características.

Em seguida, foram analisados os principais horários que auxiliam na compreensão do comportamento do usuário e sua relação com a habitação, observando os horários que os ocupantes acordam, dormem e saem e voltam do trabalho. As principais diferenças quanto à operação das aberturas, ocorre em horários que as janelas permanecem abertas ou fechadas em cada tipo de família. Na maior parte dos casos, foi identificado o uso contínuo de janelas abertas durante o dia todo, considerando que os usuários geralmente ao acordar/levantar abrem as janelas e mantêm abertas o dia todo, fechando ao sair de casa ou à noite, por segurança, em menor frequência, a chuva pode ser também determinante no fechamento da abertura. Sobre o uso de fogão e ventilador, também foram observadas diferenças significativas no modelo de família de dois moradores e no modelo de família de quatro moradores.

Em certos comportamentos, assim como em respostas relacionadas aos usos das aberturas, foram observadas algumas incoerências e contradições, dificultando a interpretação dos dados. Como a maior parte das respostas são declaradas pelos ocupantes e não foram registradas por nenhum outro método de análise, é importante destacar que os usos e comportamentos resultantes podem sofrer algumas alterações em relação a situação real. Estas incoerências podem ser resultantes das limitações de compreensão de texto e de interpretação do assunto abordado pelos usuários. Os principais implicadores neste caso são respostas tendenciosas devido ao chamado efeito Wawthorne, que considera um tipo de reação em que sujeitos modificam ou melhoram características do seu comportamento em resposta à sua consciência por estarem sendo observados (HONG et al., 2017).

## Discussões e Conclusões

A partir da realização de uma pesquisa de campo com aplicação de questionários, classificaram-se os padrões de comportamento em três categorias por Análise de Cluster. Ainda são necessários esforços complementares para aprimorar os parâmetros que resultam na divisão dos agrupamentos por comportamento dos usuários em padrões típicos, entretanto as três categorias permitiram avaliar a influência dos tipos de famílias sobre o comportamento dos usuários, isto é, individualmente ou em grupo, as ações que impactam no desempenho térmico das habitações não sofreu alterações. Foram identificados que os tipos de famílias mais representativos, demonstraram padrões de ocupação semelhantes determinados principalmente pelos horários de trabalho dos moradores.

Os resultados apontam forte correlação entre a abertura das janelas e o horário que as pessoas permanecem em casa. O fator segurança foi o indicador que mais influenciou o horário de fechar as aberturas, mesmo quando havia necessidade de mantê-la aberta para promover ventilação natural. Percebe-se uma inversão em algumas ações de adaptabilidade esperadas, tais como, o uso de ventilação mecânica no período noturno, quando as condições de temperatura externa estão mais baixas, porque as portas e janelas estão totalmente fechadas. Ressalta-se ainda que o desempenho térmico das edificações analisadas também foi afetado por alterações nas edificações, realizadas após a

ocupação, como a inclusão de grades de segurança nas aberturas e a ocupação dos recuos laterais na ampliação da área construída, essas adaptações reduzem a possibilidade de ventilação natural.

Considerando os parâmetros identificados na literatura sobre este tema, diversas pesquisas consideram que a temperatura externa é a maior responsável pela influência do comportamento dos ocupantes sobre o desempenho térmico das habitações, entretanto, os dados apresentados nesta pesquisa mostraram que a interação entre os ocupantes e as habitações sociais em clima quente e úmido são geradas pela necessidade de ventilação natural associada a rotina de acordar/levantar e dormir. As janelas permaneceram abertas independente da temperatura externa está mais alta ou mais baixa que a temperatura interna. O fator determinante para o fechamento das aberturas foi a segurança, posto que, ao dormir ou ao sair de casa, os moradores sentiram a necessidade de fechar tanto as janelas quanto às portas.

Com o resultado desta pesquisa, conclui-se que a influência do comportamento dos ocupantes sobre os modelos de simulação em clima quente e úmido podem resultar em desempenhos térmicos distintos dos modelos que consideram a temperatura externa como base para a adaptação do conforto.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da fundação que fomenta a pesquisa, tanto a bolsa quanto o Doutorado Sanduíche.

## Referências

- Andersen, Rune K.; FABI, Valentina; CORGNATI, Stefano P. Predicted and actual indoor environmental quality: Verification of occupant's behaviour models in residential buildings. *Energy and Buildings*. Volume 127, 2016. Pages 105 - 115.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design*. New York: MacGraw-Hill.
- DA YAN; O'BRIEN, William; HONG, Tianzhen; FENG, Xiaohang; GUNAY, H. Burak; TAHMASEBI, Farhang; MAHDAVI, Ardeshir. Occupant behaviour modeling for building performance simulation: Current state and future challenges. *Energy and Buildings*, Volume 107, 15 November 2015, Pages 264-278, ISSN 0378-7788.
- FABI, Valentina; ANDERSEN, Rune V; CORGNATI, Stefano; OLESEN, Bjarne W. Occupant's window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. *Building and Environment*. Volume 58, 2012, Pages 188 - 198.
- HAN, Jie; et al. Field study on occupant's thermal comfort and residential thermal environment in a hot-humid climate of China. *Building and Environment*. Volume 42, 2007, Pages 4043 - 4050.
- SORGATO, Marcio José. **A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais**. Universidade Federal de Santa Catarina (Tese de doutorado). Florianópolis, 2015
- HONG, Tianzhen; TAYLOR-LANGE, Sarah C.; D'OCA, Simona; DA YAN; CORGNATI, Stefano P. Corgnati. **Advances in research and applications of energy-related occupant behaviour in buildings**, *Energy and Buildings*, Volume 116, 15 March 2016, Pages 694-702, ISSN 0378-7788.
- ROETZEL, Astrid; et al. A review of occupant control on natural ventilation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 14, 2010. Pages 1001 - 1013.
- ZHANG, Yufan; BARRET, Peter. Factors influencing the occupant's window opening behaviour in a naturally ventilated office building. *Building and Environment*. 50, 2012, 125-134.



# Evaluación de Estrategias de Iluminación y Ventilación Natural en etapas tempranas del proceso de diseño de un Edificio de Oficinas en Talca, Chile

Evaluation of Lighting and Natural Ventilation Strategies in early stages of design process of an office-building in Talca, Chile

## C. Matías Tapia Maureira

Departamento de Diseño y Teoría de la Arquitectura, Universidad del Bío-Bío  
Avenida Collao N° 1202, 4030000, Concepción, Chile  
[christopher.tapia1601@alumnos.ubiobio.cl](mailto:christopher.tapia1601@alumnos.ubiobio.cl)

## Carolina Espinoza Sanhueza

Departamento de Diseño y Teoría de la Arquitectura, Universidad del Bío-Bío  
Avenida Collao N° 1202, 4030000, Concepción, Chile  
[cespinozasanhueza@gmail.com](mailto:cespinozasanhueza@gmail.com)

## Humberto Fuentes González

Departamento de Diseño y Teoría de la Arquitectura, Universidad del Bío-Bío  
Avenida Collao N° 1202, 4030000, Concepción, Chile  
[hjfuentesg@gmail.com](mailto:hjfuentesg@gmail.com)

Manuscript Code: 042

Date of Acceptance/Reception: 06.07.2018/31.05.2018

## Resumen

Durante las etapas tempranas de diseño, es importante definir estrategias pasivas, las cuales determinarán aspectos básicos del edificio, como su morfología, programa interior y orientación. Debido a que no es posible realizar una simulación exhaustiva, se utilizan herramientas de menor envergadura, las cuales entregarán resultados que pueden orientar a diseñadores y arquitectos a optar por mejores estrategias pasivas en edificios. El caso de estudio corresponde al mejoramiento de un edificio de oficinas en la ciudad de Talca VII Región de Chile, a través de la incorporación integrada de estrategias de iluminación y ventilación natural evaluando su eficacia mediante las herramientas Velux Daylight Visualizer y Optivent. Los resultados muestran mejoramiento a través del cambio de niveles de reflectancia en superficies interiores, modificación de áreas de ventanas e implementación de elementos para el confort visual dentro del área de trabajo. En el caso de la ventilación natural el estudio da luces sobre la importancia del contexto urbano y emplazamiento, como también el software de simulación muestran la necesidad de uso de estrategias activas cuando las estrategias pasivas no son suficientes para asegurar la calidad del ambiente interior. El uso de estas herramientas permite tomar decisiones tempranas de diseño y eficiencia energética en edificios con el fin de mejorar su ambiente interior y propuesta conceptual.

**Palabras claves:** Etapa inicial de diseño; simulación; estrategias pasivas; ventilación natural, iluminación natural.

## Abstract

During the early stages of design, it is important to define passive strategies; which will determine basic aspects of the building, like morphology, interior program and orientation. According to the fact that it is not possible to perform an exhaustive simulation, some tools are used, which deliver results that can guide designers and architects to opt for better passive strategies in buildings. The case of study corresponds to an improvement of an office building in Talca, VII Region in Chile, through the integration of lighting strategies and natural ventilation, simulating the efficiency with Velux Daylight Visualizer and Optivent. The results show the improvement changing the reflectance coefficient in interior surfaces, modification of the window area and the implementation of elements for the visual comfort. In the case of natural ventilation, the study shows the importance of the urban context and location, also how the simulation software shows the need to use active strategies when passive strategies are not enough to guarantee the air quality in the interior environment. The use of these tools allows taking early decisions for design and energy efficiency in buildings in order to improve the indoor environment and conceptual proposal.

**Keywords:** initial stage of design; simulation, passive design; natural ventilation, natural lighting, simulation.

## Introducción

Las etapas tempranas del diseño de edificios son cruciales para optimizar al máximo la utilización de recursos y reducir los costos del edificio en su etapa de construcción y operación (Löhnert, Dalkowski, and Sutter 2003). En el marco del diseño sostenible y de la incorporación de criterios de eficiencia energética a los edificios, se hace necesario contar con herramientas de cálculo y simulación que permitan anticipar el comportamiento del edificio en términos energéticos, térmicos y lumínicos. Programas como Design Builder, TAS, IESVE, etc, están concebidos para calcular la performance de edificios en una etapa avanzada de diseño y, por su complejidad, no resultan prácticos para evaluar la integración de estrategias de diseño en las fases iniciales del proceso. No obstante, es posible abordar esta etapa a través de la utilización de programas de cálculo y simulación de una envergadura menor, que pueden ayudar a tomar

decisiones tanto respecto de la forma y orientación de los edificios, como de la incorporación de estrategias lumínicas y de ventilación natural.

En el presente estudio se analiza la utilización de dos de estos programas de cálculo en la elaboración de una propuesta de mejoramiento de un edificio de oficinas para el contexto climático de la ciudad de Talca, Región del Maule, Chile, en términos de su comportamiento lumínico y de ventilación natural, evaluando la incorporación de distintas estrategias para optimizar su situación inicial.

## Estado del arte del problema

La ciudad de Talca (Lat: 35,5°S; Long: 71,7° W) se ubica al interior de la VII Región del Maule, en la macrozona denominada centro-sur de Chile, y se caracteriza por tener un clima templado cálido con lluvias invernales (Riosco, Reinaldo y Tesser, 2018), propio de los valles transversales de la zona central chilena. Se encuentra dentro de la zona climática 5 Centro Interior (MOP 2011). Se realiza un análisis del clima de Talca utilizando, por un lado, el módulo Weather Tool de Autodesk Ecotect y Climate Consultant, identificando que la ciudad posee una época cálida, desde diciembre a marzo, con máximas sobre los 30ª y una fría entre junio y septiembre. Se caracteriza por amplitudes térmicas que superan los 15°C. La radiación incidente es más fuerte durante las estaciones intermedias debido a la inclinación solar. Los vientos predominantes tienen orientación SO durante el verano, y N-S en el invierno.

Dado un edificio que se ubicará en esta ciudad, denominado como “caso base”, se elabora una propuesta integrando estrategias pasivas de diseño para mejorar su performance en materia de iluminación y ventilación natural considerando el contexto climático, para lo que se utilizan diferentes herramientas de cálculo y simulación. El caso base consiste en un edificio de concreto armado de 6 plantas y un subterráneo, que cuenta con un porcentaje de acristalamiento del 32%. Los niveles de iluminancia al interior del edificio son insuficientes para las tareas a realizar y las condiciones para provocar ventilación natural existentes no satisfacen los requerimientos de renovaciones aire. Para elaborar una propuesta de mejoramiento del edificio, se debe considerar la oscilación térmica anual que caracteriza el clima. En términos de iluminación natural, se deben aumentar los niveles de iluminancia interior sin incrementar las ganancias directas, ya que podría provocar sobrecalentamiento durante el verano. Esto obliga a que las estrategias de iluminación natural deban articularse con estrategias de control solar. A su vez, las estrategias de ventilación natural deben estar orientadas a ventilar y enfriar los espacios interiores sin provocar pérdidas desmedidas durante el invierno.

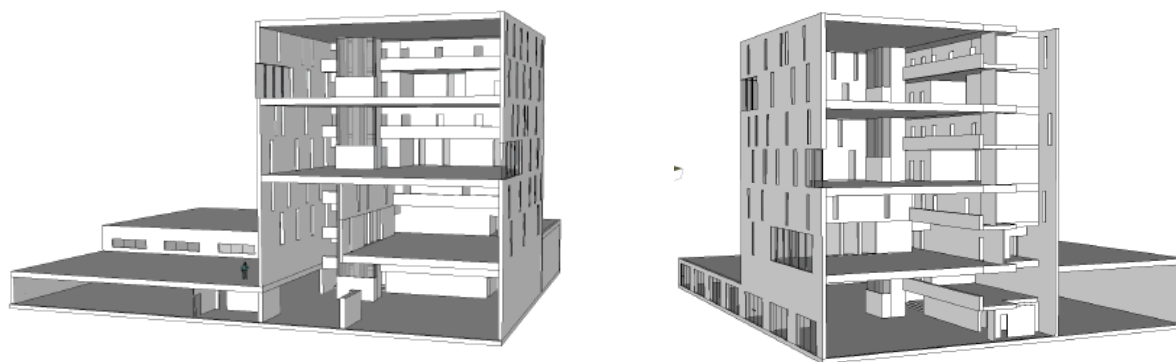


Figura 20. Edificio caso base (Fuente: elaboración propia)

En general, se evalúa provocar ventilación natural a través de efecto-stack. Además, se replantea la distribución de las superficies acristaladas y la distribución de los espacios interiores para aprovechar de mejor manera la luz diurna. Se proponen estrategias de iluminación y ventilación natural que otorguen las condiciones adecuadas para utilizar el subterráneo como sala de exposiciones. Además, se elabora una propuesta urbana con relación al emplazamiento del edificio que apoya las estrategias evaluadas a través del análisis de asoleamiento y de exposición a vientos.

## Metodología

El mejoramiento del edificio se abordó a través de dos vías; la primera de ellas consistió en el levantamiento y evaluación del caso base que permitió determinar las condiciones iniciales del edificio en términos lumínicos y de ventilación e identificar aquellos aspectos que pueden mejorar en su comportamiento. Simultáneamente, se analizó el clima de la ciudad de Talca y el microclima existente en el lugar de emplazamiento del edificio utilizando Autodesk

Ecotect para el análisis de asoleamiento y Autodesk Flow Design para el análisis de exposición a los vientos. Con ello fue posible identificar estrategias pasivas adecuadas para incorporar integradamente al edificio, elaborando una propuesta conceptual que fue posible de evaluar en Velux Daylight Visualizer y Optivent.

### Análisis de emplazamiento y propuesta de forma.

Para determinar las estrategias pasivas a incorporar en el mejoramiento del edificio fue necesario primeramente analizar las condiciones existentes en el entorno del sitio de emplazamiento escogido, para ello se consideró al análisis de influencia de los elementos circundantes en materia de asoleamiento y de exposición a los vientos predominantes. Para ello se realiza un modelo conceptual del sitio y su entorno en el software Google Sketchup, que es importado a las dos herramientas de análisis. La exposición al viento se realizó utilizando la herramienta Autodesk Flow Design y arrojó que la principal brecha que se debe sortear para la incorporación de estrategias de ventilación natural es la baja velocidad del viento existente. Las masas arbóreas hacia el sur provocando una sombra de viento de 8 metros, por lo que el edificio deberá retraerse para contar con una velocidad de viento adecuada que permita una ventilación natural.

Con esta información fue posible ubicar el edificio en un lugar del predio elegido. Se realiza un análisis de asoleamiento y exposición radiativa directa en Autodesk Ecotect, donde se obtuvieron resultados de condiciones favorables para estrategias de iluminación natural cuando el edificio estaba orientado ortogonalmente en los puntos cardinales, con altos aportes radiativos desde el norte y poniente y en la cubierta del edificio. Se realiza un análisis de las fachadas del edificio según sus distintas orientaciones. La fachada norte y poniente, además de la cubierta, son cálidas durante el invierno y verano al estar expuestas a las ganancias directas radiativas, constituyendo también la fuente de luz natural y de almacenamiento de calor a través de la masa térmica del concreto. Estas fachadas debían contar con protección solar para evitar el sobrecalentamiento en verano. Por su parte la fachada sur al no recibir ganancias directas y quedar expuesta al viento, constituye una fachada fría de pérdida de calor. Fachada oriente no es muy significativa, recibiendo ganancias directas durante las primeras horas de la mañana.

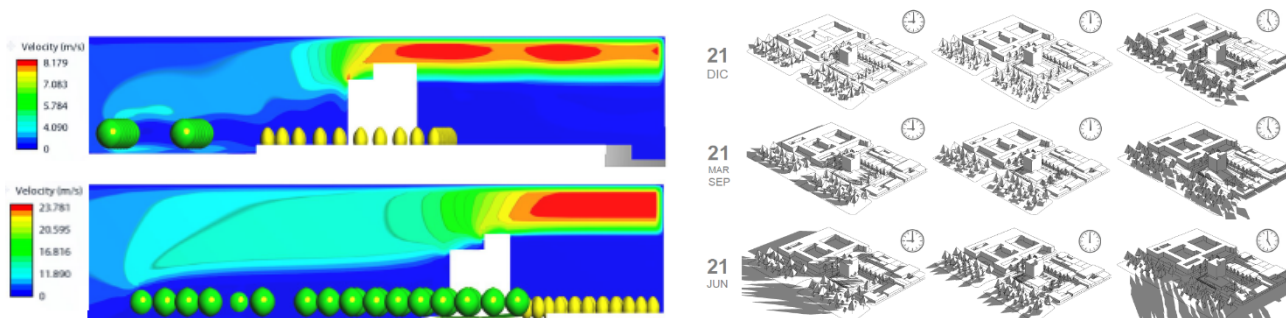


Figura 21. Der: análisis de sombra de viento en Autodesk Flow Design. Izq: análisis de asoleamiento en Autodesk Ecotect (Fuente: elaboración propia)

Para determinar estrategias de ventilación natural no es posible considerar aquellas que utilicen la velocidad del viento, por lo que se decide utilizar el diferencial de temperaturas entre la fachada sur, fachada fría expuesta al viento, y la cubierta, superficie caliente por ganancias directas y masa térmica, provocando efecto stack a través de la construcción de un espacio atrio interior que permite que el viento incidente desde las aperturas en la fachada sur se movilizara hacia el techo del edificio, donde una apertura permite expulsar el aire exhausto. Esta estrategia se apoya a su vez en la colocación de espejos de agua en el perímetro de la fachada sur que enfrían el viento antes de ingresar el edificio a través de efecto evaporativo.

Fue posible también, elaborar una propuesta inicial para el mejoramiento de edificio que abordara la oscilación térmica anual: protección solar en fachadas norte y poniente, utilizando celosías verticales y horizontales respectivamente. En el norte las ventanas deberán contar con estrategias de optimización de la iluminación natural que no comprometan un aumento en las ganancias directas; se deberán utilizar cristales de baja transmisión radiativa. Hacia el poniente, se utilizarán ventanas verticales con el mismo tipo de cristales. Se deberá utilizar la masa térmica de la fachada norte y poniente del edificio a través de una aislación exterior, pero a su vez se deberá permitir la ventilación nocturna para enfriar. Se deberán utilizar elementos vegetales caducos que obstruyan las ganancias directas en verano y las permitan en invierno. La fachada sur deberá contar con ventanas pequeñas que eviten una pérdida calórica desmedida en invierno y operables para provocar ventilación y enfriamiento natural en verano. Durante el invierno se preferirá la ventilación sólo a través de rejillas. La cubierta tendrá una chimenea solar con una altura que provoque el efecto stack deseado, su abertura deberá provocar efecto venturi para acelerar la expulsión de



aire exhausto. Otras áreas de la cubierta deberán contar con protecciones que eviten la exposición directa de este elemento a la radiación solar.

**Estrategias de Iluminación Natural.**

Debido a que esta investigación está orientada a utilizar herramientas de simulación para comprender las eventuales condiciones del ambiente interior del edificio, es necesario comprender su uso y requerimientos. El edificio cuenta con programa de oficina y sala de exposiciones, por lo que las necesidades de iluminación van acorde a la tarea. El confort visual está relacionado con niveles de iluminancia, luminancia y coeficiente de reflexión de las superficies para garantizar uniformidad en el ambiente luminoso. Se toman los valores requeridos para garantizar confort visual en ambiente interior contenidos en los TDR (2011). Los resultados de la primera evaluación del caso base se muestran en la tabla 1.

**Tabla 19.** Evaluación caso base en términos lumínicos.

| Iluminancia                             |   |                                     |
|---|---|-------------------------------------|
|   | Iluminancia tarea o área de trabajo (lux) | Iluminancia entorno inmediato (lux) |
| OFICINA - 21 de junio – 12:00           | 174.4                                     | 277.9                               |
| SALA DE EXPOSICIONES 21 de Dic. – 12:00 | 107.3                                     | 24.2                                |
| Reflectancia de las superficies         |   |                                     |
| Elemento                                | Materialidad                              | Coef. reflectancia%                 |
| Muro                                    | Hormigón pulido                           | 0.4                                 |
| Cielo                                   | Hormigón Pulido                           | 0.4                                 |
| Piso                                    | Hormigón Pulido                           | 0.4                                 |
| Plano de trabajo                        | Madera                                    | 0.6                                 |

Respecto a los niveles de iluminancia en oficinas durante el día más desfavorable, 21 de junio, el área de trabajo cuenta con valores bajo de lo recomendado, incluso siendo un área de exposición solar directa. Para el caso de la sala de exposiciones, si bien cuenta con valores inferiores a 300 lux para el 21 de diciembre, el contraste de luminancias entre superficies de tarea y fondo está por sobre lo recomendado de la Tabla 1, por lo que se deberán buscar estrategias que aseguren la uniformidad del ambiente luminoso. Con respecto al coeficiente de reflectancia presente en los muros interiores, es posible determinar una mala distribución de la luz natural dentro del espacio, incumpliendo lo establecido en la Tabla 1, pudiendo provocar molestias por parte de las fuentes de iluminación al no existir uniformidad en el ambiente luminoso, así también focos de atención que podrían producir desconcentración y un mal desempeño en las tareas. Para el mejoramiento del caso base se ha generado una distribución interior en las oficinas, donde las tareas con mayor exigencia visual se posicionan en las zonas con mayor disponibilidad de luz día, así también en la sala de exposiciones, garantizando una buena relación de luminancias entre tarea y entorno con el fin de cuidar el acceso de luz natural que deben tener los objetos que hacen parte de una colección de museo (Hefferan 2008). En ambos casos se determinan zonas en las que existen un alto requerimiento de iluminación, un mediano requerimiento de iluminación, circulaciones, zona de mínima permanencia (reuniones) y zonas sin luz natural (Fig.3). Como la disponibilidad de luz día va cambiando durante el día y también de una estación a otra, es necesario proponer estrategias acordes a la orientación del edificio (Fig. 4)

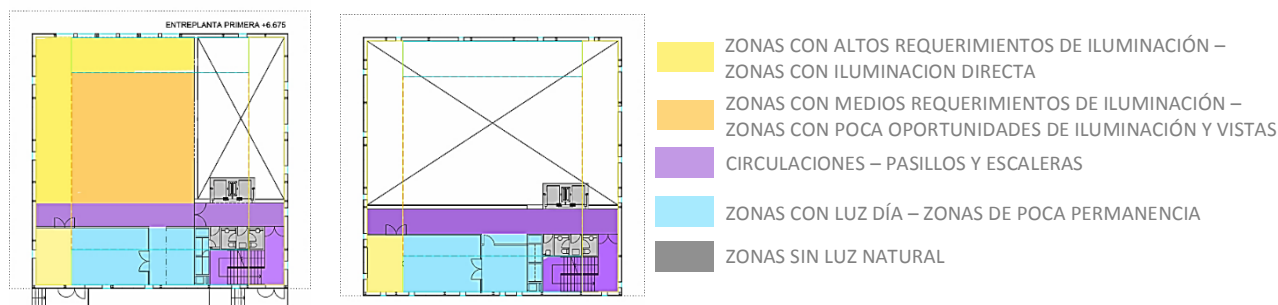


Figura 22. Zonificación de requerimientos lumínicos según destino programático (Fuente: elaboración propia)

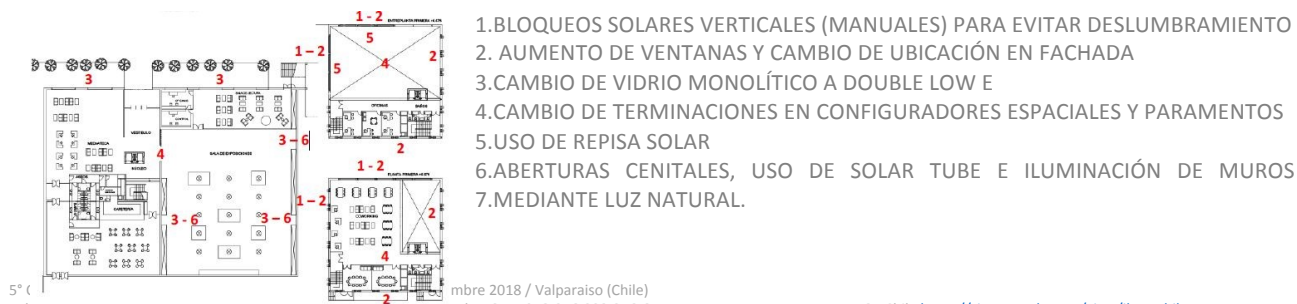


Figura 23. Proposición de estrategias pasivas según orientación de fachadas (Fuente: elaboración propia)

Para mejorar el caso base fue necesario introducir nuevas aberturas en el modelo y modificar su geometría para cumplir con los requerimientos de confort lumínico. También fue necesario cambiar parámetros de simulación respecto a la materialidad de las superficies, como indica la Tabla 2, donde se indica los materiales utilizados, obtenidos de la biblioteca del software Velux Daylight Visualizer.

**Tabla 20.** Proposición de cambio de materialidades en superficies (fuente: elaboración propia)

| Configurador Espacial | Coef. Reflect. Recomendado (%) | Material y Coef. Reflect. en caso mejorado |
|-----------------------|--------------------------------|--|
| Muro                  | 0,4 – 0,7                      | Pintura Blanca Nueva – 0,7                 |
| Techo                 | 0,7                            | Pintura Blanca Nueva – 0,7                 |
| Suelo                 | 0,2 – 0,4                      | Cerámico color beige – 0,4                 |
| Plano de Trabajo      | 0,2 – 0,6                      | Madera – Pino – 0,6                        |

Ya que el software permite evaluar la iluminación en distintas épocas del año y con diferentes tipos de cielo, se utilizaron los solsticios de invierno y verano, que constituyen períodos críticos, realizando las simulaciones bajo condiciones de cielo despejado. El resultado de la incorporación de estrategias de iluminación natural indica que en el caso mejorado se han incrementado un 100% los niveles de iluminancia en el día más desfavorable para oficinas (solsticio de invierno) respecto al caso base (Tabla 1). En el caso de la sala de exposiciones el caso más crítico corresponde a los meses de verano, donde se espera una mayor cantidad de flujo luminoso que puede afectar la exposición. Los resultados indican que los niveles de iluminancia no sobrepasan los 300 lux en sectores donde se encontrarían los objetos, cumpliendo con recomendaciones para objetos museográficos (Tabla 3).

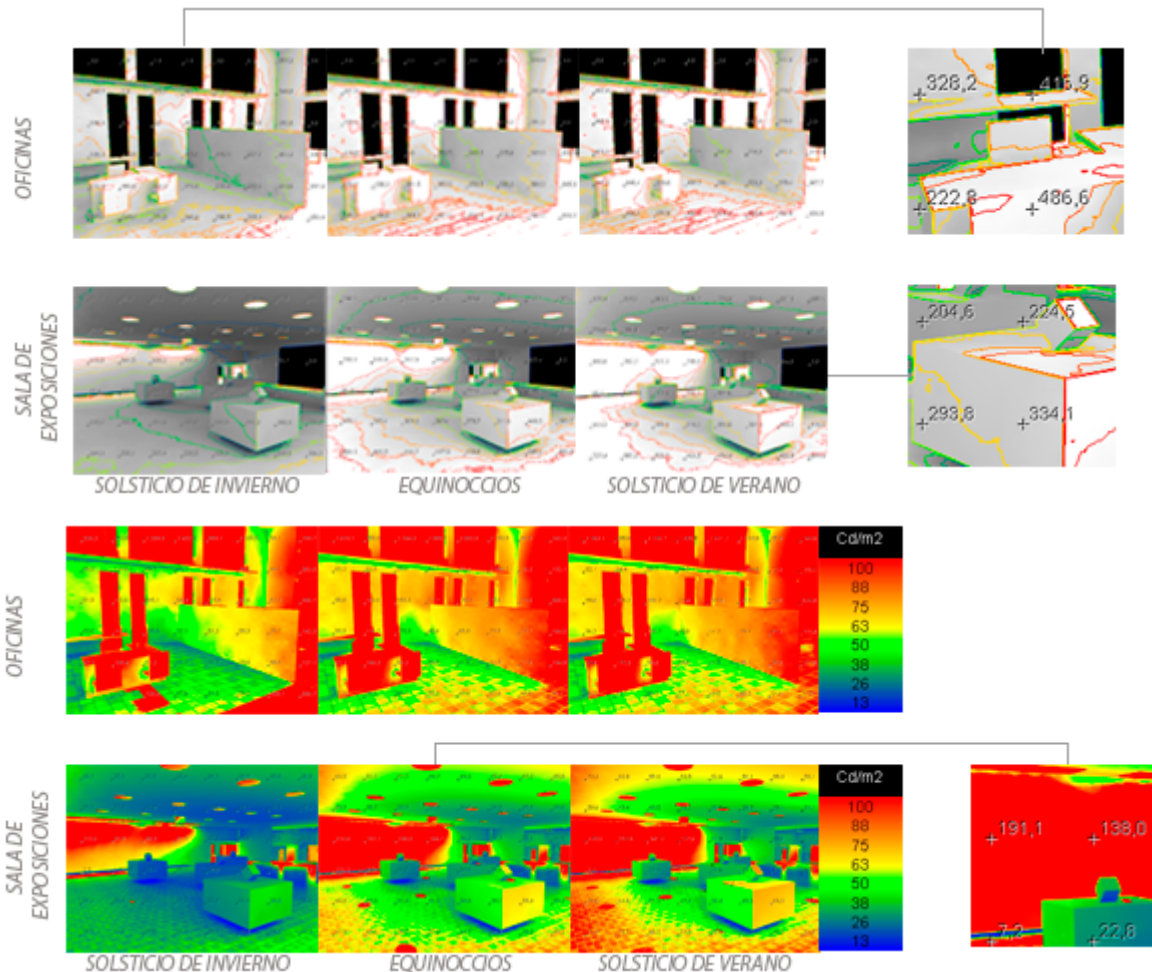


Figura 24. Simulación lumínica para distintos espacios y distintas fechas. Arriba: Iluminancias. Abajo: luminancias (Fuente: elaboración propia)

**Tabla 3.** Luminancias tarea-máximo contraste obtenidas en distintos espacios (Fuente: elaboración propia)

| Luminancia                    |                            |                                   |
|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
|                               | Luminancia oficina (cd/m2) | Luminancia S exposiciones (cd/m2) |
| Equinoccios (21/03 – 21/09)   | 141.9 – 7.2                | 50.6 – 6                          |
| Solsticio de invierno (21/06) | 142.1 – 6.2                | 30.5 – 3.6                        |
| Solsticio de verano (21/12)   | 167 – 9.3                  | 61.9 – 6.8                        |

**Estrategias de Ventilación Natural.**

La ventilación del edificio de oficinas es uno de los factores ambientales más importantes debido a que una mala calidad del aire disminuye el desempeño de las personas en funciones laborales. La simulación y el cálculo de ventilación permiten evaluar en etapas tempranas de diseño la incorporación de estrategias con el fin de tomar decisiones de diseño. La estrategia planteada para asegurar los caudales de aire exigidos por la normativa actual en el caso de estudio, implica provocar un movimiento de aire a través del diferencial de temperatura. Se ordenarán las plantas del edificio con el fin de generar un espacio vertical, o espacio “atrio”, que movilice el aire proveniente de la fachada sur hacia la cubierta donde una chimenea solar contribuirá al efecto stack a través del aumento de la altura del espacio atrio, y captando mayor radiación, propiciando el diferencial térmico. La apertura podrá regularse según la estación del año y del requerimiento de intercambio de aire interior o enfriamiento natural.

En primera instancia se determina la carga ocupacional del recinto y de los caudales mínimos de ventilación exigidos. Se utiliza la OGUC (2017) para obtener los parámetros respecto a la carga ocupacional de cada recinto. y los de ASHRAE (Stanke et al. 2007) para los requerimientos de ventilación . Se determinan los caudales mínimos de aire interior utilizando los parámetros de Tasa de Aire por Persona (TAP) que corresponde al caudal de aire exterior fresco por persona según el programa de ocupación del recinto que consulta el proyecto. Para calcular los requerimientos de aire se estudia la entreplanta primera del proyecto que resulta como la más representativa.

**Tabla 21.** Tabla resumen cálculo de requerimientos de caudal y de ach (fuente: elaboración propia)

| Recinto  | Carga ocupacional | Superficie | Altura recinto h | Ocupantes | Tasa de aire por persona [Tap] | Caudal minimo por recinto | ACH Cambios de Aire |
|----------|-------------------|------------|------------------|-----------|--------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Oficina  | 10                | 203,75     | 6,5              | 20,38     | 2,5                            | 50,94                     | 0,14                |
| Comedor  | 1,5               | 51         | 3,25             | 34,00     | 3,8                            | 129,20                    | 2,81                |
| Cocina   | 15                | 20,4       | 3,25             | 1,36      | 2,5                            | 3,40                      | 0,18                |
| Escalera | 5                 | 25,06      | 3,25             | 5,01      | 2,5                            | 12,53                     | 0,55                |
| pasillo  | 5                 | 54,7       | 3,25             | 10,94     | 2,5                            | 27,35                     | 0,55                |
| Baños    | 6                 | 9,02       | 3,25             | 1,50      | 2,5                            | 3,76                      | 0,46                |

Se utiliza la herramienta Optivent que permite evaluar la estrategia de diseño del atrio. La entrada de datos correspondientes al edificio son: localización, cálculo de aire, geometría, ganancias solares y condiciones internas. Mediante esta simulación fue posible determinar la superficie de área efectiva, correspondiente al área de entrada de aire hacia el edificio, y la altura mínima que debiese tener el atrio para propiciar el efecto Stack. Así mismo entrega información con respecto a la acción predominante del viento asociado a una correcta orientación del edificio y posibles cambios en la velocidad del aire relacionados al área efectiva de la apertura superior al posibilitar un efecto venturi. El entorno de la herramienta permite cargar todos los parámetros asociados a la ubicación, materialidad y todo lo relevante con el testeo.

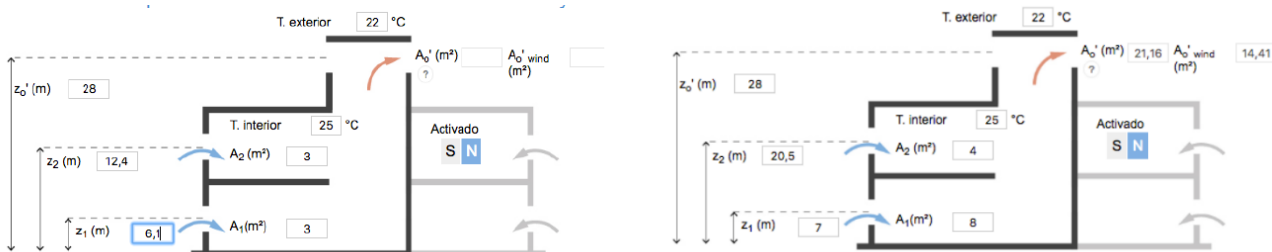


Figura 25. Interfaz para el ingreso de datos de Optivent. Der: condiciones de borde iniciales en primer evaluación Izq: condiciones de borde en caso mejorado (Fuente: elaboración propia)

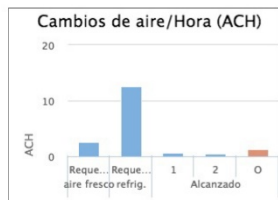
El uso de la herramienta Optivent, mediante la simulación al caso de estudio, da cuenta de la acción del efecto stack y

efecto Venturi sobre los requerimientos de ventilación. Los resultados en primera instancia indicaron que dicha estrategia no es posible de satisfacer a los requerimientos sin apoyo de medios mecánicos.

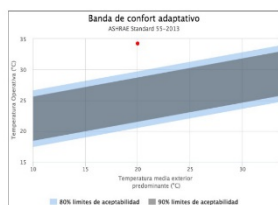
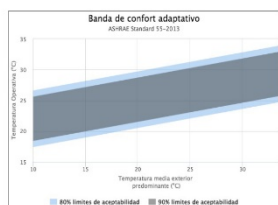
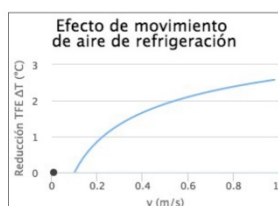
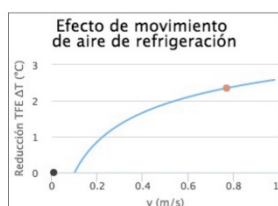
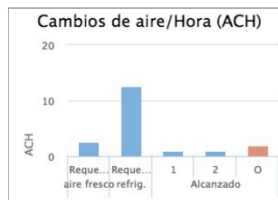
Una segunda evaluación se realiza incorporando mejoras que apuntan a aumentar la dimensión de apertura de expulsión, que con viento predominante puede ser un gran aporte por efecto Venturi; aumentar el área efectiva de ventana correspondiente a niveles o pisos inferiores; aumentar la altura del atrio, la cual propicia el efecto Stack. El

resultado esta vez se acerca más a la ventilación requerida sin embargo depende de la flotabilidad y los vientos se articulan para trabajar juntos, por lo que cuando no existe

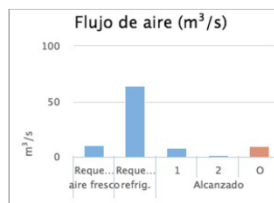
**Buoyancy driven**



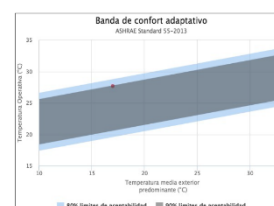
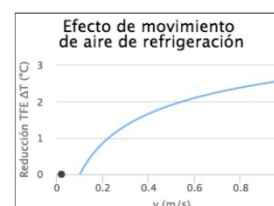
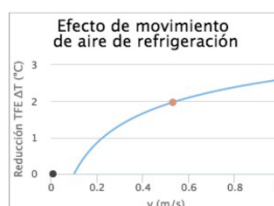
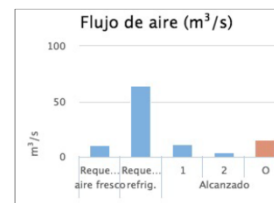
**Buoyancy + Wind driven**



**Buoyancy driven**



**Buoyancy + Wind driven**



suficiente viento exterior el sistema de ventilación natural no logra los niveles de renovación de aire necesarios. Si bien los resultados de Optivent arrojan una temperatura interior dentro del rango de confort, si no existe disponibilidad de viento se produce sobrecalentamiento. Esta información fue necesaria para determinar que la estrategia propuesta y su dimensionamiento no son suficientes para satisfacer los requerimientos de renovación de aire, por lo que requerirá un sistema mecánico que la apoye, sobre todo aquellos días que no se cuente con disponibilidad de viento.

Figura 26. Comparación entre el primer (Der) y la segunda (izq) análisis en Optivent (Fuente: elaboración propia)

**Resultados**

Considerando el contexto climático de la ciudad de Talca, y a través de la evaluación con distintas herramientas, fue posible la elaboración de una propuesta de mejoramiento del caso base, incorporando integralmente estrategias de iluminación y ventilación natural sin descuidar el confort térmico interior del edificio

Respecto a los resultados obtenidos con el software de simulación lumínica Velux Daylight Visualizer, fue posible a través de la incorporación de estrategias de iluminación natural obtener un mejoramiento del 100% de los niveles de iluminancias en áreas destinadas a tareas de oficina, y un control de valores de iluminancia durante todas las épocas del año que no sobrepasan los 300 lux en áreas destinadas a objetos en sala de exposiciones, evitando el daño de estos y preservándolos a través del tiempo. También, una mejora en la distribución de luminancias en recintos interiores, donde tarea y alrededores inmediatos están dentro de la relación 10:1, de acuerdo a las recomendaciones del MOP (2011) reduciendo la posibilidad de disconfort con una buena comprensión de lo que se expone en el espacio. En el caso de el área de oficinas, los resultados muestran una buena distribución de la luz dentro del espacio, sin grandes impactos los cuales puedan producir algún tipo de molestia o desconcentración que pueda afectar al observador, no sobrepasando la relación de 20:1 correspondiente a fuente luminosa y entorno. Respecto a las luminancias encontradas en muros, se encuentra por sobre las 30 cd/m<sup>2</sup>, pero sobrepasan las 100cd/m<sup>2</sup>. Si bien los expertos recomiendan que se encuentre dentro de este rango, esta está lejos de producir molestia al observador, debido a que no sobrepasa la relación de máximo contraste, 40:1(MOP 2011)

En términos de la incorporación de estrategias de ventilación natural fue posible determinar a través del uso de la herramienta Optivent, que la estrategia del espacio atrio era insuficiente por sí sola para satisfacer los requerimientos de intercambio de aire interior ya que dependía de la disponibilidad de la flotabilidad y velocidad del aire para su funcionamiento óptimo. En estas circunstancias, el espacio atrio provocaba que el edificio se encontrara un 80% del tiempo dentro de la banda de confort adaptativo, con una temperatura entre los 17 y los 27°C. Cuando eso no se cumplía se producía sobrecalentamiento alcanzando temperaturas sobre los 29°C en horario de ocupación. Si bien, la propuesta cumplía con los estándares estipulados de la normativa ASHRAE, ocurría solo bajo condiciones de viento favorable y no logran satisfacer la ventilación del edificio en todo su periodo de funcionamiento. Por otra parte, la aplicación directa de esta disposición es bajo un escenario de todas las aperturas abiertas en un 90 % y en simultáneo, lo que constituye una condición poco probable, que además podría producir desconfort por ráfagas de viento molesto en el área de trabajo. Con los datos de los caudales obtenidos desde Optivent fue posible determinar que era necesaria la utilización de un sistema mecánico de ventilación que apoyara la estrategia de ventilación natural cuando no exista disponibilidad de aire exterior.

## Discusión y Conclusiones

Mediante esta investigación es posible entregar información respecto a la utilización e implementación de herramientas de simulación y cálculo que son útiles en etapas tempranas de diseño debido a su menor envergadura y que permiten evaluar preliminarmente la eficacia en la incorporación de estrategias pasivas de diseño al edificio.

Respecto a la herramienta Optivent, fue útil para determinar en primera instancia la eficacia de la estrategia de ventilación natural propuesta a partir del análisis del contexto climático. En este caso fue posible determinar la necesidad de utilizar sistemas de ventilación mecánica en los meses críticos para apoyar la primera. La herramienta también permitió evaluar la eficacia de incorporar elementos que optimizaran esta estrategia provocando Efecto Venturi o incrementando el Efecto Stack, al utilizar los vientos predominantes y el movimiento del aire. Además, permitió dimensionar las entradas y salidas de ventilación. Decisiones como estas impactan directamente no sólo en el confort y la calidad del ambiente interior del edificio, sino también en su performance energética ya que sin su implementación el uso de ventilación mecánica durante todo el año en el contexto climático descrito produciría un consumo energético desmedido.

Con respecto al uso de softwares de simulación de iluminación es posible concluir que estos permiten entregar un panorama de posibles focos de desconfort, los cuales pueden producir molestia en el usuario y afectar en el desempeño en el área de trabajo destinado a oficinas. En este caso, la sala de exposiciones la herramienta es útil para incorporar estrategias que eviten un posible daño a elementos que compongan una muestra museográfica, las que por su carácter necesitan prevalecer en el tiempo. En el caso de las oficinas, se utilizan para incorporar estrategias que eviten que el confort del usuario sea perturbado por posibles focos de desconcentración, lo que podría provocar una disminución en la productividad ya sea en el área laboral o educacional. Esto se puede prevenir incorporando estrategias y medidas correspondientes desde las primeras etapas del proyecto.

Herramientas como estas permiten incorporar estrategias pasivas respecto a la geometría del edificio, a su distribución interior y respecto de su contexto, orientadas a aumentar su confort y calidad de ambiente interior y a disminuir su demanda energética. La utilización de herramientas de simulación integradas en etapas tempranas de diseño permite tomar decisiones acerca de cuáles estrategias son pertinentes de incorporar, con el fin de mejorar la habitabilidad de los usuarios en espacios interiores de manera sustentable.

## Referencias

- Hefferan, Steven. 2008. "Working with Daylight in the Museum Environment." *WAAC Newsletter* 30 (1):22–24.
- Löhnert, G, a Dalkowski, and W Sutter. 2003. "Integrated Design Process: A Guideline for Sustainable and Solar-Optimised Building Design." *Berlin: IEA International Energy Agency*, no. April. [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)9742-597X\(1994\)10:5\(55\)%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Integrated+design+process.+A+Guideline+for+Sustainable+and+Solar-Optimised+Building+Design#0](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)9742-597X(1994)10:5(55)%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Integrated+design+process.+A+Guideline+for+Sustainable+and+Solar-Optimised+Building+Design#0).
- MOP. 2011. TDR: Términos de Referencia Estandarizados con Parámetros de Eficiencia Energética y Confort Ambiental, para Licitaciones de Diseño y Obra de la Dirección de Arquitectura, Según Zonas Geográficas del País y Según Tipología de Edificios Términos de Referencia Estandarizados con Parámetros de Eficiencia Energética y Confort Ambiental, para Licitaciones de Diseño y Obra de la Dirección de Arquitectura, Según Zonas Geográficas del País y Según Tipología de Edificios.
- Stanke, Dennis a, Roger L Hedrick, Leon E Alevantis, Michael G Apte, Lynn G Bellenger, David C Bixby, David R Conover, et al. 2007. "ASHRAE STANDARD Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality." *Health Care* 2007:1–4. <https://doi.org/ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2004>.



Rioseco, Reinaldo y Tesser, Claudio : Cartografía Interactiva de los climas de Chile [en línea]. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile. <[www.uc.cl/sw\\_educ/geografia/cartografiainteractiva](http://www.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva)> 2018  
OGUC, 2017. Ordenanza General de Urbanismo y Construcción



# Ferramenta computacional para a verificação da viabilidade econômica de soluções racionais em relação ao uso da água em edificações

**André Barcellos Ferreira** (Autor principal / Autor de Contacto)

Filiación: Universidade Federal do Espírito Santo

Dirección: Rua Ludwik Macal, nº 1275, apto. 302A, Mata da Praia, Vitória - ES, Brasil, CEP 29060-030

Correo: andrebarcellosferreira@gmail.com

**Dr. João Luiz Calmon**

Filiación: Universidade Federal do Espírito Santo

Dirección: Rua Moacir Avidos, nº 448, apto 302, Praia do Canto, Vitória - ES, Brasil, CEP 29055-350

Correo: calmonbarcelona@gmail.com

**Dr. Jorge Leonid Aching Samatelo**

Filiación: Universidade Federal do Espírito Santo

Dirección: Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória - ES, CEP 29075-073

Correo: rigvedas@gmail.com

**Dr. Ricardo Franci Gonçalves**

Filiación: Universidade Federal do Espírito Santo

Dirección: Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória - ES, CEP 29075-073

Correo: rfg822@gmail.com

**Manuscript Code:** 043

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

## Resumen en portugués

O momento atual é de preocupação em relação à oferta de água para consumo; o estresse hídrico, representado pelo desbalanço entre demanda e oferta, é crescente. Apesar do conhecimento dessa realidade, as iniciativas que a confrontam, de gestão de oferta ou demanda, são limitadas, e estão, na maioria das vezes, a cargo do estado. Quando se trata do usuário final, elas estão concentradas em grandes consumidores, como indústrias. Ao usuário comum, faltam dados que o façam enxergar tais gastos como investimentos, ao invés de custos. Do ponto de vista desse usuário, essas medidas podem incluir a utilização de dispositivos economizadores, e de fontes alternativas à água potável, sejam águas pluviais, sejam de reuso. Este trabalho visa discutir e desenvolver uma ferramenta que permita a análise da viabilidade econômica de tais soluções. Isso será feito através da determinação do período de retorno desses investimentos; através da utilização de composições de custos unitários fornecidas por órgãos estatais (SINAPI, IOPEs etc.), ligadas aos elementos correspondentes nas instalações projetadas. Tudo considerando que a edificação seja projetada em BIM (Building Information Modeling), mais especificamente no software Autodesk Revit. O resultado deste estudo é uma solução complementar ao software Revit (um plug-in), que automatize o processo. Esse plug-in objetiva a obtenção do dado de viabilidade desses investimentos, como parte da etapa de projeto, acelerando e contribuindo para a adoção de tais soluções.

**Palabras claves en portugués:** Revit; API; Plug-in; BIM; Reuso.

## Abstract in English

The present moment is of concern about the offer of water for consumption; the hydric stress, represented by the imbalance between demand and offer, is growing. Despite the awareness about this reality, the initiatives to confront it, of offer and demand management, are limited, and are, most of the time, carried out by the State. When it comes to the final user, they are concentrated in great consumers, like industries. For the common user, there is a lack of information which would make him see such expenditure as investments, instead of costs. From the user perspective, these measures may include the use of water-saving devices, and alternatives to the potable water, whether rainwater or greywater. This study aims at discussing and developing a tool which allows the analysis of the economic viability of water-saving solutions in residential buildings. It will be done through the determination of the payback period of these investments; through the use of unit prices tables from State bodies (SINAPI, IOPEs etc.), linked to the corresponding elements in the systems designed. Everything considering that the building will be designed using BIM (Building Information Modeling), specifically the software Autodesk Revit. The result of this study will be a complementary solution to Revit (a plug-in), which will automate the process. This plug-in's objective is to obtain the information about the viability of the investment, as part of the design stage, accelerating and contributing to the adoption of these solutions.

**Keywords in English:** Revit; API; Plug-in; BIM; Reuse.

## Introdução

A água sempre foi fator determinante para o desenvolvimento das civilizações, essencial para todas as atividades humanas. Algumas regiões se caracterizaram historicamente pela escassez de água, enquanto outras são sinônimo de abundância desse recurso. Esse é o caso do Brasil, em termos médios (HESPANHOL, 2008). No entanto, de dimensões

continentais, ele possui diferentes tipos de clima. Algumas regiões, como o Nordeste, há tempos são caracterizadas por essa escassez (BRASIL, 2007), mas, nos últimos anos, vários estados passaram a sofrer com o problema. Dados da Associação Brasileira de Empresas de Saneamento (SANEAR, 2015) revelam que a partir de 2014 se abateu sobre a região Sudeste a maior seca dos últimos 80 anos.

Essa escassez se traduz no fenômeno chamado de estresse hídrico, que constitui o desbalanço entre a oferta e a demanda de água. Aliada às mudanças climáticas, a concentração populacional cada vez maior nos grandes centros tende a ampliar cada vez mais esse desbalanço, exigindo a adoção de medidas (BRASIL, 2007). Essas medidas, normalmente, ficam a cargo do estado, e se dividem em dois grupos: de gestão de oferta e de gestão de demanda. As medidas de gestão de oferta envolvem grandes obras, altos investimentos, grandes redes de distribuição ou transposições, e nem sempre são viáveis (HESPANHOL, 2008). As medidas de gestão de demanda, por outro lado, estão restritas a períodos de alto estresse hídrico, incluindo racionamento e rodízio, por exemplo.

No entanto, medidas de gestão de oferta e demanda também podem ser adotadas no âmbito do consumidor, e incluem utilização de dispositivos economizadores, reuso de águas servidas, aproveitamento de águas pluviais, entre outras. Mas, do ponto de vista do consumidor, o fator de decisão a respeito da adoção de qualquer medida é se ela trará ou não vantagem financeira. Num fluxo tradicional, essa informação depende da elaboração completa dos projetos (o tradicional e aquele dotado de soluções voltadas à gestão de oferta e demanda), elaboração dos orçamentos, e ainda de alto conhecimento técnico dos envolvidos.

Nesse cenário, é extremamente útil, e serve ainda como contribuição para adoção em maior escala, uma ferramenta que permita otimizar essa análise, trazendo todo o processo, de orçamento dos sistemas, entrada dos dados de custos de operação, montante economizado, características do consumo na edificação, para a etapa de projeto. Este artigo detalha a criação de uma ferramenta de software com essas características, concebida como um plug-in para o software Autodesk Revit.

## Estado da arte do problema

Vários estudos mostraram a viabilidade econômica de tais sistemas (URKIAGA et al., 2008; FRIEDLER; HADARI, 2006; HERNÁNDEZ, 2006; MORALES-PINZON et al., 2014; BERHANU et al., 2016; NAIK; STENSTROM, 2016; YU et al., 2016; AMOS; RAHMAN; GATHENYA, 2016; JUAN et al., 2016; OVIEDO-OCAÑA et al., 2017; URSINO; GRISI, 2017). Mas os estudos foram conduzidos com casos específicos, devido à complexidade a análise.

## Metodología

A análise de viabilidade depende inicialmente das soluções consideradas. Ela será feita considerando três possibilidades, adotadas individualmente ou em conjunto: utilização de dispositivos economizadores; reaproveitamento de águas cinzas; e aproveitamento de águas pluviais. A viabilidade do sistema é verificada comparando-se o custo com o valor economizado em função dele ao longo de sua vida útil.

Para a análise da viabilidade, são considerados os seguintes indicadores:

- Valor presente líquido (VPL): consiste em trazer para o presente ( $t = 0$ ) todos os fluxos de caixa de um investimento (isto é, corrigi-los pela inflação, ou pelo custo de capital definido) e soma-los ao investimento inicial. Se  $VPL = 0$ , o investimento é indiferente; se  $VPL > 0$ , ele é atrativo; e se  $VPL < 0$ , ele não é atrativo. Considere-se para a definição do valor presente líquido a Equação 1:

$$VPL = I - \sum_{n=1}^n \left( \frac{FC_t}{(1+r)^t} \right) \quad (1)$$

onde:  $I$  é o investimento inicial;  $FC_t$  é o fluxo de caixa (ou lucro líquido) para o período  $t$ ;  $r$  é o custo do capital definido; e  $n$  é o número de períodos.

- Período de retorno: período requerido para que os recebimentos do fluxo de caixa de um investimento se igualem ao investimento inicial.



O resultado da análise é dado na forma do período de retorno. O investimento inicial é considerado como a diferença entre os custos (obtidos através dos respectivos orçamentos) dos sistemas. Os sistemas são orçados automaticamente, através da leitura de tabelas de composições unitárias, utilizando os quantitativos obtidos no Revit. O valor economizado, por período, é dado pela diferença entre o custo do volume de água potável economizado e os custos de operação e manutenção do sistema.

O período de retorno é comparado com o período de vida útil do sistema, e deve ser inferior para que ele seja economicamente viável. O custo do capital considerado é a taxa de juros. Os balanços de fluxo de caixa são mensais. Caso o resultado não seja inteiro, a fração resultante é dividida por 30,5 (número de dias considerado por mês), o cálculo é repetido considerando fluxos de caixa diários, e o resultado, fornecido em meses e dias.

O período de retorno (dado pela Equação 1) é função do fluxo de caixa por mês, assim como da taxa de juros. O fluxo de caixa foi assumido como o valor economizado em função da economia de água menos o custo de operação e manutenção do sistema. A economia de água é o produto do volume (de água potável) economizado pelo preço da água. O volume de água potável economizado é dado pela Equação 2:

$$FC_t = Pop \cdot C \left[ \sum_{i=1}^n VEDT_i \cdot TEUDT_i \cdot FEDT_i - \sum_{i=1}^n VEDE_i \cdot TEUDE_i \cdot FEDE_i - \right. \\ \left. (1 - CASP) \cdot \sum_{n=1}^n \underbrace{VEDANP_i \cdot TEUDANP_i \cdot FEDANP_i}_B \right] \underbrace{PA}_{A} - \underbrace{(PB_{AP} \cdot TO_{AP} + PB_{AR} \cdot TO_{AR}) \cdot PE}_C + COM_2 \quad (2)$$

onde: VEDTi = vazão estimada para o dispositivo tradicional i; TEUDTi = tempo estimado por uso para o dispositivo tradicional i; FEDTi = frequência estimada de uso por dia para o dispositivo tradicional i; VEDEi = vazão estimada para o dispositivo economizador i; TEUDEi = tempo estimado por uso para o dispositivo economizador i; FEDEi = frequência estimada de uso por dia para o dispositivo economizador i; CASP = confiabilidade do suprimento de água pluvial; VEDANPi = vazão estimada para o dispositivo abastecido por água não potável i; TEUDANPi = tempo estimado por uso para o dispositivo abastecido por água não potável i; FEDANPi = frequência estimada de usos por dia para o dispositivo abastecido por água não potável i; PBAP = potência da bomba do sistema de aproveitamento de águas pluviais; TOAP = tempo de operação da bomba do sistema de aproveitamento de águas pluviais; PBAR = potência da bomba do sistema de reuso de águas servidas; TOAR = tempo de operação da bomba do sistema de reuso de águas servidas; PE = preço da energia; COM2 = custo de operação e manutenção de ambos os sistemas, descontado o custo com bombeamento.

A expressão acima só é válida para o caso em que o aproveitamento de águas pluviais for considerado, e o reuso de águas cinzas não. Caso ambos sejam considerados (ou apenas o reuso de águas cinzas), como admite-se que o suprimento de águas cinzas para reuso é maior do que o consumo, o trecho denominado B na Equação 1 deixa de existir. Igualmente, os termos do trecho C dependem da utilização de cada um dos sistemas.

Para definir os consumos dos aparelhos, o consumo total dado pela soma dos consumos per capita médios diários obtidos da literatura foi comparado com o consumo médio de cada estado (segundo informações do Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento). A razão entre os dois deu origem a uma constante. Como os dados são anuais, o consumo médio foi aproximado por uma função logarítmica, resultando em constantes diferentes, por ano e por estado.

A Tabela 1 traz, como exemplo, os dados da literatura a respeito do consumo de torneiras de lavatório:

Tabela 1 – Dados de consumo da torneira de lavatório. Preparado pelos autores, 2018.

| Dispositivo                 | Vazão (l/s)          | Tempo de uso (s/uso) | Consumo (l/uso) | Frequência (usos/dia) | Consumo (l/dia) |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
| Tradicional                 |                      |                      |                 |                       |                 |
| De 2 a 10 mca               | 0,167 <sup>(1)</sup> | 15 <sup>(4)</sup>    | 2,505           | 12 <sup>(4)</sup>     | 30,06           |
| De 10 a 40 mca              | 0,333 <sup>(1)</sup> | 15 <sup>(4)</sup>    | 4,995           | 12 <sup>(4)</sup>     | 59,94           |
| Disp. economizador          |                      |                      |                 |                       |                 |
| Hidromecânica               | 0,07 <sup>(3)</sup>  | 8,9 <sup>(4)</sup>   | 0,623           | 12 <sup>(4)</sup>     | 7,476           |
| Sensor fotoelétrico         | 0,05 <sup>(3)</sup>  | 3,9 <sup>(4)</sup>   | 0,195           | 12 <sup>(4)</sup>     | 2,34            |
| Com arejador                | 0,05 <sup>(2)</sup>  | 15 <sup>(4)</sup>    | 0,75            | 12 <sup>(4)</sup>     | 9               |
| Com pulverizador            | 0,03 <sup>(2)</sup>  | 15 <sup>(4)</sup>    | 0,45            | 12 <sup>(4)</sup>     | 5,4             |
| Registro regulador de vazão |                      |                      |                 |                       |                 |
| Até 6 mca                   | 0,13 <sup>(3)</sup>  | 15 <sup>(4)</sup>    | 1,95            | 12 <sup>(4)</sup>     | 23,4            |
| De 15 a 20 mca              | 0,21 <sup>(3)</sup>  | 15 <sup>(1)</sup>    | 3,15            | 12 <sup>(4)</sup>     | 37,8            |

Nota: os números entre parêntesis indicam a fonte do dado: MOTTA, S. et al., 2008 (1); DREHER, V. 2008 (2); SABESP, 2010 (3); GONÇALVES, 2006 (4).

Como exemplo, a Tabela 2 traz a equação resultante da interpolação dos dados de consumo per capita para os estados da região Sudeste:

Tabela 2 – Equações de consumo per capita em função do tempo por estado. Preparado pelos autores, 2018.

| Estado         | Equação                          | R <sup>2</sup> |
|----------------|----------------------------------|----------------|
| Espírito Santo | $y = -0,002\ln(x-2006) + 189,26$ | 3E-08          |
| Minas gerais   | $y = 8,3271\ln(x-2006) + 137,28$ | 0,5003         |
| Rio de Janeiro | $y = 22,792\ln(x-2006) + 201,79$ | 0,5362         |
| São Paulo      | $y = 1,0088\ln(x-2006) + 178,51$ | 0,0055         |

O consumo total considerando todos os aparelhos tradicionais de uso interno (lavatório, chuveiro, bacia sanitária, pia da cozinha e tanque) calculado foi de 278,81 litros/pessoa/dia. A Tabela 3 traz as constantes resultantes da razão entre esse consumo e o calculado pelas equações da Tabela 2, para os mesmos estados, para o ano de 2019.

Tabela 3 – Fatores de correção por estado (para o ano de 2019). Preparado pelos autores, 2018.

| Estado         | Consumo calculado pela equação da Tabela 2 | Fator de correção |
|----------------|--|-------------------|
| Espírito Santo | 189,2549                                   | 0,6788            |
| Minas gerais   | 158,6386                                   | 0,5690            |
| Rio de Janeiro | 260,2503                                   | 0,9334            |
| São Paulo      | 181,0975                                   | 0,6495            |

O valor de COM<sub>2</sub>, na Equação 1, será dado por:

$$COM_2 = (COM_{AP} + CPQ_{AP} + CSMP_{AP} + CEOF_{AP}) + (CMO_{AR} + CPQ_{AR} + CSMP_{AR} + CEOF_{AR}) \quad (3)$$

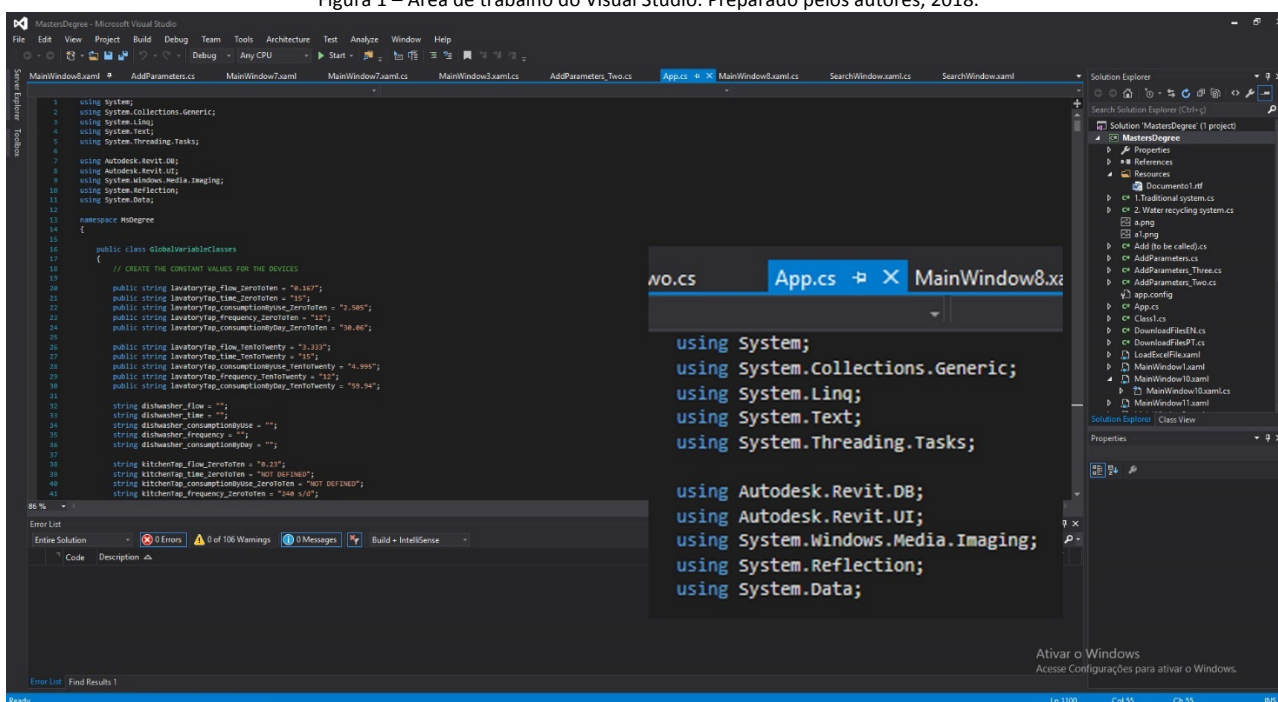
onde: CMOAP = custo com mão de obra do sistema de aproveitamento de águas pluviais; CPQAP = custo com produtos químicos do sistema de aproveitamento de águas pluviais; CSMPAP = custo de manutenção e substituição de peças do sistema de aproveitamento de águas pluviais; CEOFAP = custo de energia para outros fins do sistema de aproveitamento de águas pluviais; CMOAR = custo com mão de obra do sistema de reuso; CPQAR = custo com produtos químicos do sistema de reuso; CSMPAR = custo de manutenção e substituição de peças do sistema de reuso; CEOFAR = custo de energia para outros fins do sistema de reuso.

De posse desses dados, todos calculados dinamicamente pelo software, após a conclusão das configurações e seleção dos respectivos sistemas pelo usuário, o resultado será dado automaticamente.

Para a criação do plug-in, foi necessário utilizar a API (“application programming interface”) do Revit. Através dela, os programadores podem interagir com o software, utilizando qualquer linguagem que utilize o .NET Framework. Neste trabalho, utilizou-se a linguagem Visual C#.

O Revit atua como aplicação principal (*parent*), e o plug-in como aplicação dependente (*child*). O plug-in foi criado como uma solução no software Visual Studio; constitui-se de diversos arquivos, entre códigos puros e interfaces gráficas. Nessa solução, todas as grandezas e propriedades existentes no modelo do Revit podem ser acessados na forma de propriedades, e utilizados ou modificados da forma que se deseje. Os elementos são acessados na forma de coleções (interface *ICollection*). As interfaces ilustram a o que representa herança, do ponto de vista da programação; são um mecanismo que simplesmente especifica o tipo de informação que uma classe que herde delas deve fornecer.

Figura 1 – Área de trabalho do Visual Studio. Preparado pelos autores, 2018.



O desenvolvimento iniciou-se pela criação do código central da solução (chamado de App.cs), que simplesmente implementa a estrutura padrão para o desenvolvimento de plug-ins para o Revit, através da inserção de diretivas using adicionais no início do código. Quando se inicia uma solução no Visual Studio, dependendo do modelo escolhido, algumas diretivas já estão presentes, formando uma estrutura inicial para o código. O que essas diretivas fazem é trazer ao escopo os namespaces especificados por elas. O plug-in foi criado utilizando como modelo a opção Class Library (biblioteca de classes), que, ao ser compilado, gera um arquivo no formato DLL. Às diretivas já existentes no modelo foram adicionadas duas, relacionadas ao Revit:

- using Autodesk.Revit.DB (que permite acesso à base de dados do software);
- using Autodesk.Revit.UI (que permite acesso à interface do software).

Além disso, para utilizar a API do Revit, duas referências (arquivos localizados no diretório de instalação do Revit) necessitaram ser adicionadas à solução:

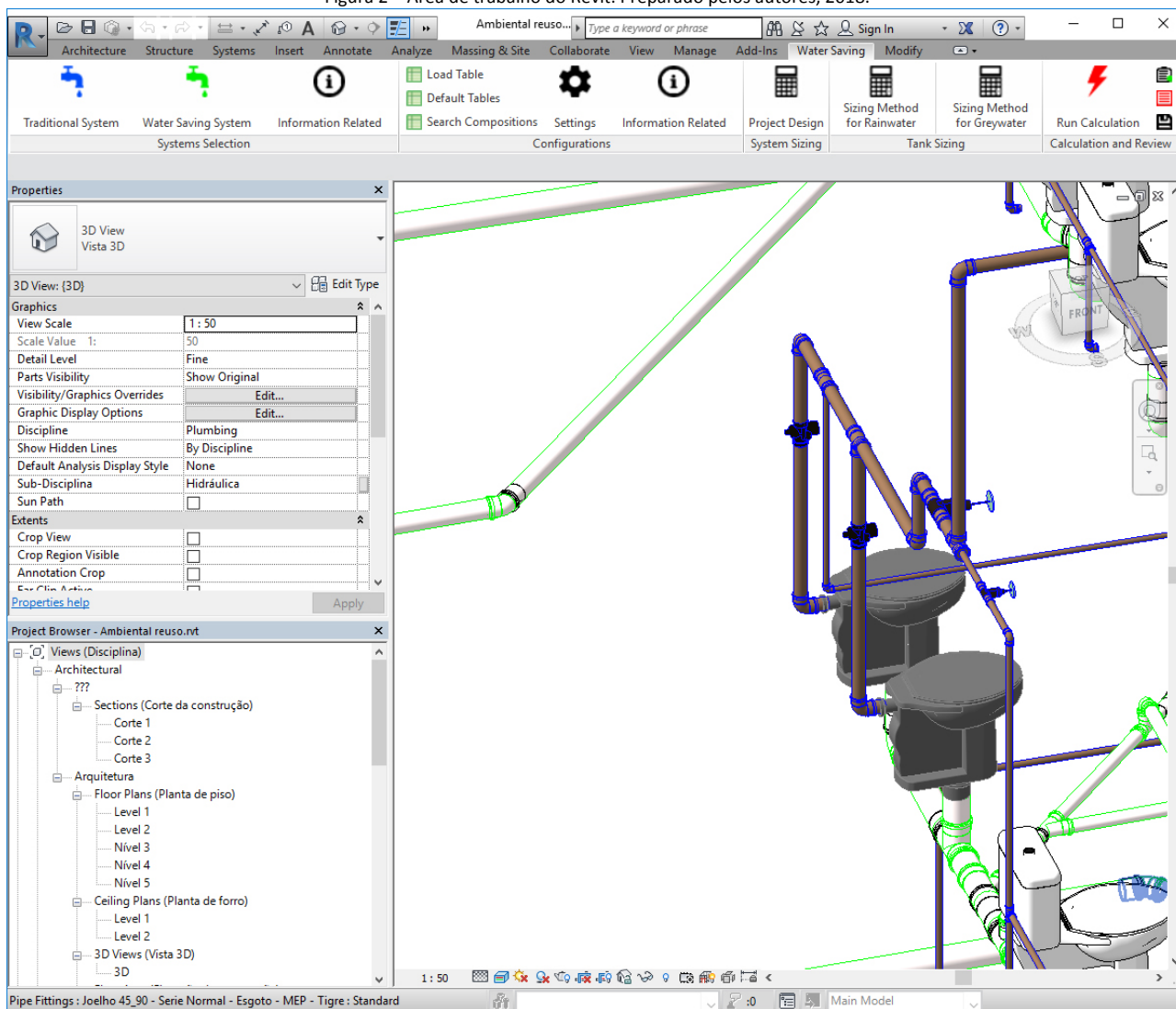
- RevitAPI.dll
- RevitAPIUI.dll.

Os demais códigos, que formam a solução, e implementam toda a parte lógica e gráfica dos botões criados, são feitos a partir da solução inicial. Finalmente, para que a solução seja carregada pelo software ao ser iniciado é necessário

utilizar um arquivo chamado de manifest file (um arquivo de texto, de extensão ADDIN), que aponta para o arquivo DLL que contém a solução no diretório da máquina.

O plug-in foi concebido como uma guia adicional na área de trabalho do Revit, denominada *Water Saving*. A Figura 3 mostra a área de trabalho do Revit com a guia correspondente ao plug-in selecionada. Ela está dividida em painéis (*Systems Selection, Configurations, System Sizing, Tank Sizing e Calculation and Review*), que agrupam os comandos por funcionalidade.

Figura 2 – Área de trabalho do Revit. Preparado pelos autores, 2018.



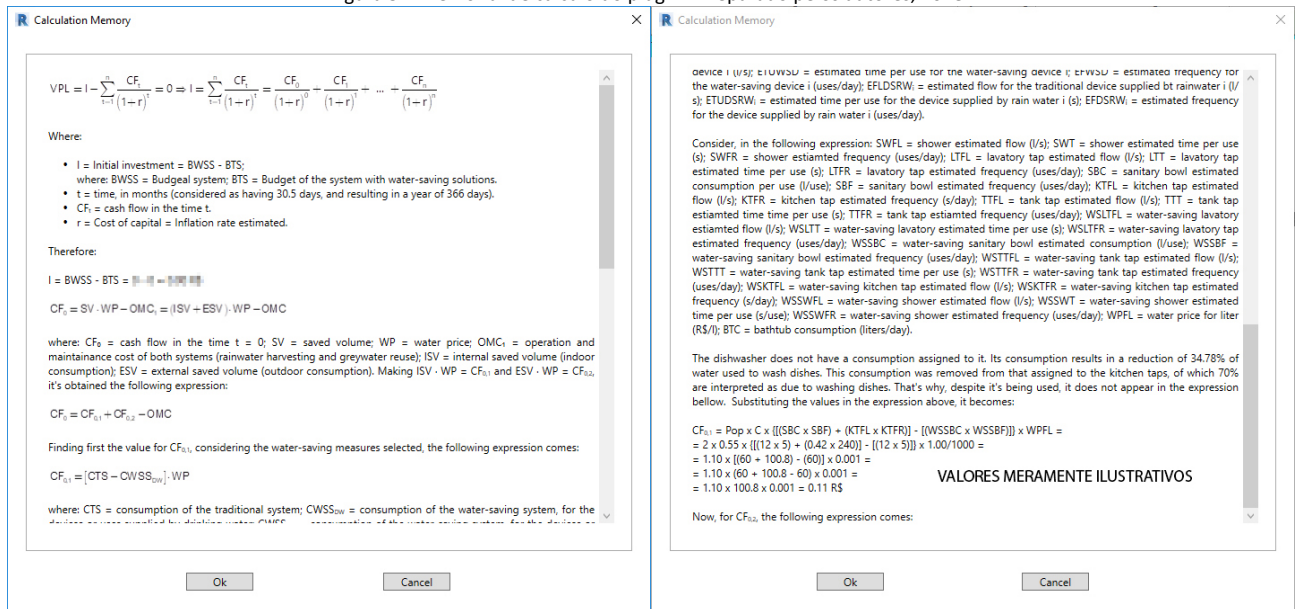
O sistema possui parâmetros para tipo de medidas economizadoras consideradas, características da edificação (que irão caracterizar o consumo), dados financeiros (custo da água, energia, taxa de juros), e configurações relacionadas ao sistema de tratamento utilizado. Os elementos do sistema (tubulação, joelhos, registros etc.) possuem os parâmetros “código” e “tabela fonte”, para que seu custo seja considerado no orçamento. Aparelhos sanitários possuem três parâmetros adicionais: “tipo de dispositivo”, “tipo de dispositivo economizador considerado”, e “tipo de água utilizado”. Todos os elementos possuem o parâmetro “considerar no orçamento”, cuja finalidade é permitir a utilização de composições unitárias que incluem vários elementos (excluindo do orçamento elementos que já estejam dentro de outras composições). O procedimento para a utilização do plug-in é o que segue:

- Seleção de ambos os sistemas, através dos comandos *Traditional System* e *Water Saving System*. Para isso os sistemas devem estar completamente selecionados e a propriedade *Phase Created* de seus elementos deve estar corretamente configurada.
- Carregamento das tabelas com as composições de custos unitárias que serão utilizadas, através do comando *Load Table*.

- Associação de composições unitárias a cada um dos elementos presentes nos sistemas, através do comando *Search Compositions*.
- Conclusão das configurações (gerais, de dispositivos, e adicionais) através do comando *Settings*.
- Revisão geral, através do comando *Review*.
- Processamento do cálculo, através do comando *Run Calculation*.

O comando *Calculation Memory* exibe o memorial de cálculo (Figura 3), detalhado, passo a passo, onde é possível analisar o impacto de cada uma das configurações do projeto no resultado.

Figura 3 – Memorial de cálculo do plug-in. Preparado pelos autores, 2018.



## Conclusão

O objetivo principal desse trabalho foi discutir e desenvolver uma ferramenta que permitisse a análise da viabilidade econômica de soluções para a economia de água em edificações. Isso foi alcançado, através da criação de uma solução complementar ao software Autodesk Revit. Essa opção tornou a utilização da solução extremamente direta, e acessível, ao projetista que já utilize o Revit em seus projetos. Mais do que isso, condicionou seu emprego à utilização do Revit para projetar, contribuindo para a difusão do BIM entre os profissionais. No entanto, este trabalho se ateu apenas a edificações residenciais unifamiliares. Como sugestão para trabalhos futuros, cita-se o desenvolvimento de soluções que compreendam outros tipos de edificações.

## Agradecimentos

Agradecemos a FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA E INOVAÇÃO DO ESPÍRITO SANTO - FAPES pelo fomento a bolsa de pesquisador capixaba.

## Referencias

- Berhanu, B. M., Blackhurst, M., Kirisits, M. J., Jamarillo, P., & Carlson, D. (2017). Feasibility of Water Efficiency and Reuse Technologies as Demand-Side Strategies for Urban Water Management. *Journal of Industrial Ecology*, 21(2), 320–331. <https://doi.org/10.1111/jiec.12430>
- BRASIL. Agência Nacional das Águas - ANA. (2007). *Disponibilidade e Demanda de Recursos Hídricos no Brasil, Cadernos de Recursos Hídricos 2*.
- Christian Amos, C., Rahman, A., & Mwangi Gathenya, J. (2016). Economic Analysis and Feasibility of Rainwater Harvesting Systems in Urban and Peri-Urban Environments: A Review of the Global Situation with a Special Focus on Australia and Kenya. *Water*, 8(4), 149. <https://doi.org/10.3390/w8040149>
- Costa, L. M. (2015, March). 2015 já registra 932 municípios em situação de emergência por seca ou estiagem. *SANEAR: A REVISTA DO SANEAMENTO BÁSICO*, 14–16.
- Dreher, V. L. P. (2008). *Possíveis Soluções para o Uso Racional da Água na Edificação Da Câmara Municipal de Porto Alegre*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- Friedler, E., & Hadari, M. (2006). Economic feasibility of on-site greywater reuse in multi-storey buildings. *Desalination*, 190(1–3), 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.10.007>
- Gonçalves, R. F. (2006). *Uso racional da água em edificações* (1st ed.). Rio de Janeiro.
- Hernández, F., Urkiaga, A., De las Fuentes, L., Bis, B., Chiru, E., Balasz, B., & Wintgens, T. (2006). Feasibility studies for water reuse projects: an economical approach. *Desalination*, 187(1–3), 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.084>
- Hespanhol, I. (2008). Um novo paradigma para a gestão de recursos hídricos. *Estudos Avançados*, 22(63), 131–158. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200009>
- Juan, Y.-K., Chen, Y., & Lin, J.-M. (2016). Greywater Reuse System Design and Economic Analysis for Residential Buildings in Taiwan. *Water*, 8(11), 546. <https://doi.org/10.3390/w8110546>
- Morales-Pinzón, T., Lurueña, R., Gabarrell, X., Gasol, C. M., & Rieradevall, J. (2014). Financial and environmental modelling of water hardness — Implications for utilising harvested rainwater in washing machines. *Science of The Total Environment*, 470–471, 1257–1271. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.101>
- Motta, S. R. F., Alves, A. H. V., Souza, R. V., & De, G. (2008). Proposta para Classificação da Eficiência do Uso da Água nas Edificações Residenciais. In *NUTAU 2008* (pp. 1–9). São Paulo: FAU-USP.
- Naik, K. S., & Stenstrom, M. K. (2016). A Feasibility Analysis Methodology for Decentralized Wastewater Systems - Energy-Efficiency and Cost. *Water Environment Research*, 88(3), 201–209. <https://doi.org/10.2175/106143016X14504669767337>
- Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I., Ward, S., Rivera-Sanchez, M. L., & Zaraza-Peña, J. M. (2018). Financial feasibility of end-user designed rainwater harvesting and greywater reuse systems for high water use households. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), 19200–19216. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8710-5>
- SABESP – COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. (2010). *O Uso Racional da Água*. São Paulo.
- Urkiaga, A., de las Fuentes, L., Bis, B., Chiru, E., Balasz, B., & Hernández, F. (2008). Development of analysis tools for social, economic and ecological effects of water reuse. *Desalination*, 218(1–3), 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.08.023>
- Ursino, N., & Grisi, A. (2017). Reliability and efficiency of rainwater harvesting systems under different climatic and operational scenarios. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12(01), 194–199. <https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N1-194-199>
- Yu, Z. L., Rahardianto, A., Stenstrom, M. K., & Cohen, Y. (2016). Performance and Economic Evaluation of a Semibatch Vertical-Flow Wetland for Onsite Residential Bathroom Graywater Treatment. *Journal - American Water Works Association*, 108, E392–E404. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2016.108.0079>



# Morfología arquitectónica y uso potencial de energías renovables a escala urbana y de edificios.

## Architectural morphology and potential use of renewable energies at urban and building scale.

### Raúl F. Ajmat

Filiación: Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de Tucumán.

Dirección: Av. Kirchner 1800, San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina CP 4000.

Correo: rfajmat@hotmail.com

### María Victoria Longhini

Filiación: Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de Tucumán.

Dirección: Av. Kirchner 1800, San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina CP 4000.

Correo: victoria\_longhini@hotmail.com

### José D. Sandoval

Filiación: Instituto de Luz, Ambiente y Visión, Universidad Nacional de Tucumán.

Dirección: Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina CP 4000.

Correo: jsandoval@herrera.unt.edu.ar

**Manuscript Code:** XXX (esto no debe llenarse)

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018 (esto no debe llenarse)

### Resumen

El presente trabajo es un estudio conceptual-experimental de simulación de los efectos del entorno urbano construido sobre la incidencia de la luz natural en los patios interiores de edificios, insertos en la trama urbana de la ciudad de San Miguel de Tucumán (SMT). Se busca mostrar la importancia de la simulación en las etapas tempranas del diseño urbano-arquitectónico y su interacción con el entorno inmediato, apuntando a las consecuencias que puedan producirse en términos de disponibilidad de luz natural. En particular en este trabajo se toman dos escenarios como áreas de estudio, se plantean situaciones actuales y reales, confrontándolas con situaciones extremas de explotación de las posibilidades que brinda hoy el código urbano de SMT, donde se estudia el impacto del Código de Planificación Urbano (CPU) en su relación con el entorno construido desde el punto de vista morfológico con un lenguaje formal compatible, y también desde el respeto por el acceso a radiación solar y luz natural en patios interiores.

**Palabras claves:** Simulación; Luz natural; Morfología; Urbano; Patios de luz.

### Abstract

This work is a simulation-experimental study of the effects of the urban environment on the incidence of natural light in the multi storey buildings courtyards, within the urban plot of the city of San Miguel de Tucumán (SMT). It seeks to illustrate the importance of simulation in the early stages of urban-architectural design and its interaction with the immediate environment, investigating the consequences that may occur in terms of availability of natural light. Some scenarios are taken as areas of study, current and real situations are posed, confronting them with extreme situations of exploitation of the possibilities allowed by the urban code of SMT, where the impact of the Urban Planning Code is studied in its relationship with the built environment from the morphological point of view and also with respect for access to solar radiation and natural light in buildings' courtyards.

**Keywords:** Simulation; Daylight; Urban Morphology; Buildings' courtyards.

## Introducción

El desarrollo sostenible y una planificación urbana eficiente son dos de los temas más preocupantes, desarrollados y estudiados en relación a los procesos de cambio climático inminentes. Los profesionales que estudiamos la ciudad,

debemos plantearnos un nuevo tipo de planificación urbana que beneficie a quienes la habitan, así podemos hablar por ejemplo, de un nuevo concepto como el de Planificación Urbana Solar, que apunta a cuestiones climático-ambientales pero que impacta sobre cuestiones morfológicas-urbanas, tema sobre el que muchos autores han trabajado; y por otro lado, evaluar los efectos ambientales sobre los edificios existentes, a fin de proporcionar directrices para evaluar el Potencial de uso de energía limpia -Potencial de radiación solar- en áreas urbanas. Ésta sería una herramienta útil en las primeras fases del diseño para urbanistas, arquitectos y afines, pudiendo prever así los efectos de la morfología urbana o las modificaciones en la geometría de los edificios respecto de captación de luz natural o radiación en superficies o ámbitos urbanos.

La Ciudad requiere que los planificadores, arquitectos y diseñadores cumplan con los códigos, legislaciones y pautas de diseño referidas a acceso solar y del derecho a la luz, y que los mismos puedan evaluar el impacto de los nuevos edificios en los edificios circundantes; que aún hoy son incipientes o casi inexistentes en numerosas ciudades del mundo, sobre todo en países latinoamericanos.

“Es necesario proporcionar la información solar y de disponibilidad diurna requerida para cualquier área urbana, de una manera visualmente significativa, de manera que se pueda hacer una evaluación rápida tanto para los edificios existentes como para los no construidos. El acceso solar y la regulación del derecho a la luz pueden imponer limitaciones específicas a la geometría de un esquema. Particularmente durante las primeras fases de diseño, es necesario utilizar herramientas de simulación dinámica para evaluar el potencial solar y de luz del día de un sitio, incluso antes de que se diseñe un edificio.” (Lobaccaro & Francesco Frontini, 2013)

Diversos estudios apuntan hacia la optimización de la morfología edilicia para maximizar el acceso solar, estudiando todas las variables intervinientes, ya sean morfológicas, climáticas, legales, etc. Así como evaluar el potencial solar sobre edificios futuros y existentes, en conjunto con su interacción con el medio urbano directo.

## Estado del arte del problema

Frente a la creciente demanda energética a nivel mundial, y las limitaciones de los sistemas tradicionales para cubrir esta demanda es que surgen una serie de nuevas alternativas referidos a las energías renovables en relación con la morfología urbana y la capacidad de captación solar de la ciudad, para que mediante nuevos proyectos incentivar la producción de energías renovables como políticas de estado en la planificación urbana, llamada: passive solar urban design. Podemos hablar de una revolución energética-urbana, que debe ir sorteando una serie de transiciones políticas, económicas, culturales.

Cabe mencionar el papel importante que juega a nivel mundial el concentrarse en estudios sobre el crecimiento de la población urbana a cerca de cuestiones relacionadas con el consumo energético, seguridad energética, cambio climático y apoyo institucional para llevar a cabo las propuestas y apoyar el cambio. El buen uso de las simulaciones de escenarios, actuales y futuros es una muy buena herramienta para apoyar estos estudios. La modelización como herramienta para cálculo y visualización de las diversas alternativas o situaciones climáticas potenciales o actuales de una ciudad respecto de potencial de energía limpia solar o de acceso a luz natural en patios de luz de edificios o centros de manzanas, son objeto de estudio actualmente en busca de una solución eficaz para resolver el problema. Se busca principalmente un modelo sistemático aplicable a cualquier unidad urbana existente o a desarrollar para poder definir en él pautas dinámicas con el fin de comprender los factores y parámetros que determinan la potencialidad solar de esa unidad de estudio y así llegar a conclusiones que permitan desarrollar lineamientos para su concreción, siempre apoyados por entidades de gestión que colaboren al cumplimiento de estos objetivos.

“Uno de los principales problemas es el complejo y dinámico efecto de eclosión sobre las superficies de los edificios. Algunos análisis preliminares durante las primeras fases del diseño podrían evitar el efecto de la reducción de la disponibilidad solar, lo que influye en el potencial de los sistemas solares, así como en la luz del día y el rendimiento térmico de los edificios.” (Sauchelli, Lobaccaro, Masera & Fiorito, 2013)

“La simulación es valiosa en la escala de construcción y ciudad con el fin de evaluar la influencia que tiene la forma en la disponibilidad de superficie para la captura de energía solar. En ambos casos, construcción y ciudad, las operaciones morfológicas permiten a los diseñadores aumentar la posibilidad de un mayor y mejor uso de la energía solar ya sea por aumento de superficie o por el estudio de las sombras que los edificios se arrojan entre sí.” (Kamal & Smiriti, 2014)

El diseño asistido por computadora nos muestra el proceso completo de fabricación de un determinado producto con todas y cada una de sus características como tamaño, contorno, etc. Las muchas posibilidades que nos ofrece para el diseño fomentan la creatividad y la experimentación.

Arquitectura y diseño digital se complementan y se unen al generar un objeto utilizando técnicas y herramientas digitales. Así, las Técnicas Digitales resultan de gran ayuda en las distintas instancias del diseño arquitectónico, como herramienta para la formalización de ideas, complementándose con otra muy potente: la geometría. Así también, se plantea una mirada crítica respecto de otros ejemplos, que carecen de soluciones arquitectónicas, funcionales y ambientales y donde el diseño no tiene el estudio suficiente para satisfacer las demandas del medio.



Es de suma importancia poder generar sistemas inteligentes de cálculo y modelado que permitan conectar y gestionar datos para poder obtener de manera rápida y sencilla valores que permitan tomar decisiones de diseño con base científica.

“Estas herramientas se pueden aprovechar para el modelado durante las fases tempranas del diseño arquitectónico e incluso para dar forma a la morfología de las ciudades del mañana. Durante las etapas tempranas de diseño tienen el potencial de impactar directamente en el consumo de energía a largo plazo estudiando el posible uso de la irradiación para la generación de energía limpia, y de previsualizar que el crecimiento desmedido y no planificado de la ciudad condiciona la disponibilidad de luz natural a lo largo de los años, reduciendo la disponibilidad lumínica de patios interiores y centros de manzana”. (Longhini & Ajmat, 2017)

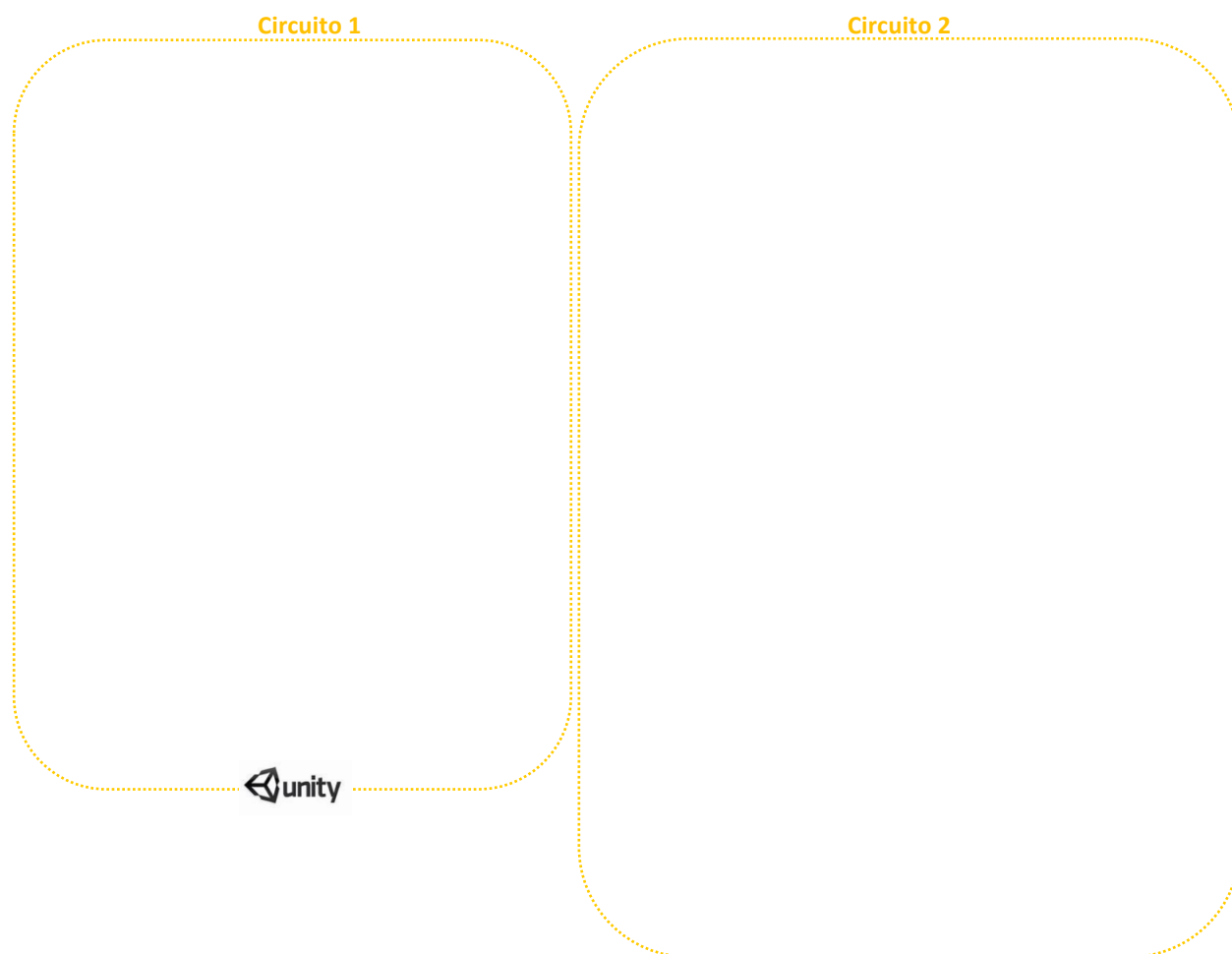
## Metodología

### Simulación y experimento

El punto de partida de esta metodología es la generación de geometrías mediante software apropiados (Revit y SketchUp, en conjunto con Unity) optimizados para trabajar el modelado de escenarios morfológicos y volumétricas; a continuación, el procesamiento de la incidencia de la radiación en las superficies (Insight) y finalmente el post-tratamiento de los resultados con la ayuda de hojas de cálculo y de interfaz gráfico (Excel) para la presentación de datos.

Una vez que se generan geometrías representativas de cada escenario, el potencial de la radiación solar en las fachadas de los edificios se determina utilizando un gráfico - modelo computacional que funciona sobre la base de los datos climáticos por hora. (Figura 5). El rendimiento solar para diferentes escenarios se puede estudiar todo el año o a lo largo de un día típico en cada temporada. Por lo tanto, la influencia de la altura en la calidad del medio ambiente generada debido a cada edificio o un grupo de ellos hacia los espacios urbanos dentro y por fuera se puede analizar fácilmente.

Para las simulaciones presentadas en el trabajo se consideran las situaciones más desfavorables, referidas a morfología, orientación y clima.



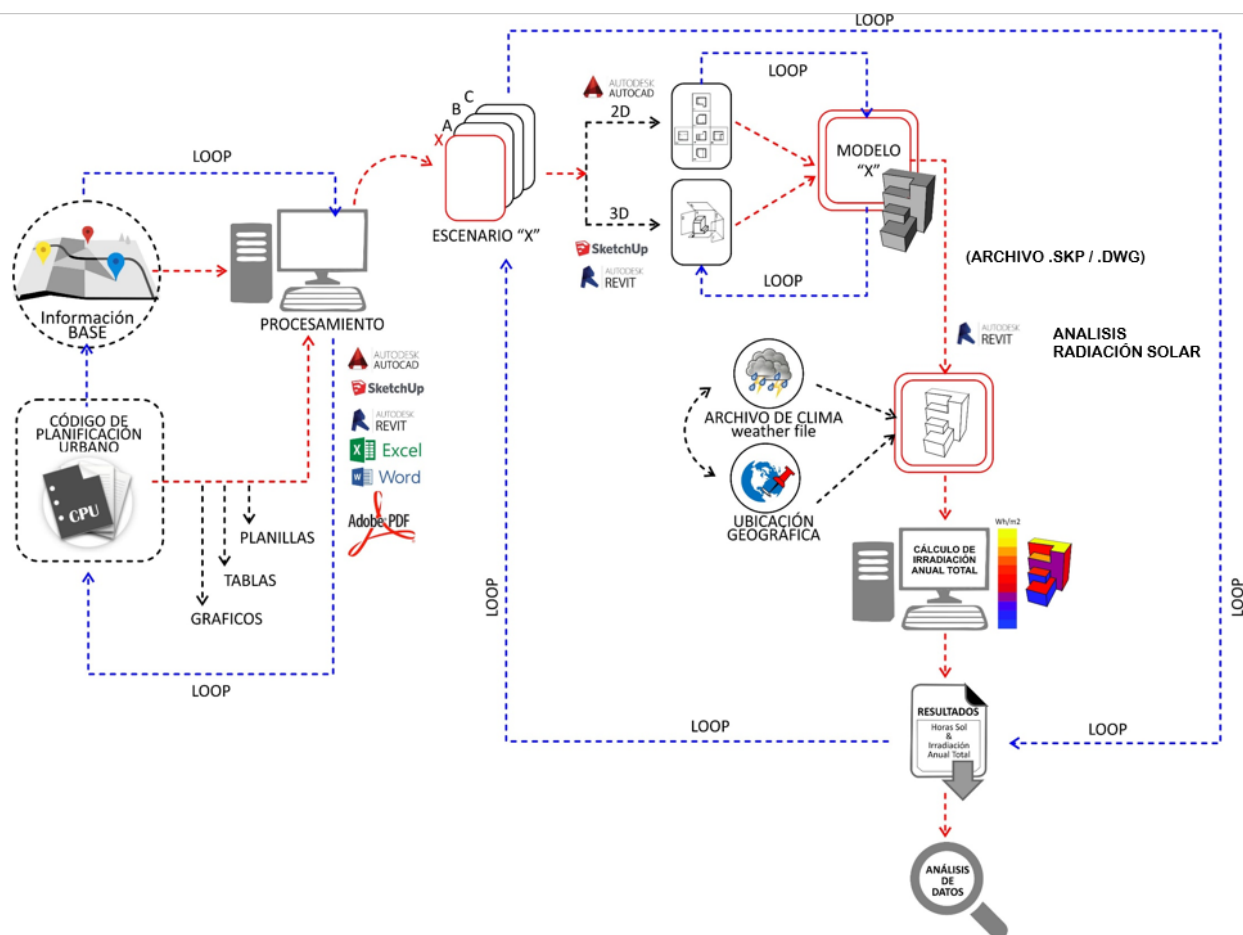


Figura 5. Proceso de simulación, sistematización de base de datos y procesamientos de datos para resultados. Fuente: Propia, 2017.

El proceso de simulación propuesto está conformado de dos grandes circuitos. Por un lado, el circuito de carga de datos y generación sistemática morfológica parametrizada. Por otro lado, el circuito de simulación de los distintos escenarios generados y la capacidad de potencial de producción de energía limpia basado en la captación de radiación solar simulada en cada morfología propuesta.

Inicia con la carga de datos en el Software Unity para la generación morfológica de los distintos escenarios. Se trabaja con un archivo base generado por nosotros llamado “edificador” que cuenta con una base programada en base a simplificaciones y requerimientos reales del CPU SMT actual. Las simplificaciones radican en racionalizar las manzanas respecto de sus medidas, así como sistematizar y sintetizar tipologías de lotes, teniendo en cuenta retiros y centros de manzana. Esto facilita la carga de datos dentro del “edificador”.

Se trabaja con una medida normalizada de manzana (120 x 120 m) con retiros de frentes (5 m) y con medidas de centro de manzana (para la de 120\*120m corresponden 35m). Los lotes se simplifican en 5 tipologías (de ancho constante, pero de profundidad variable) y se suma a ellas la tipología en esquina. Se trabaja también con volúmenes entrantes y salientes (voladizos y patios de luz).

De esta manera el “edificador” queda conformado, con previo análisis de todas las variables que contempla el CPU de SMT. Sobre este se cargan los datos requeridos para conformar los diferentes escenarios propuestos un lote, una cuadra, una manzana o un sector de la ciudad. Pueden generarse aleatoriamente algunos parámetros como la altura o las dimensiones de los patios de luz y dar lugar a una imagen más realista de los posibles escenarios urbanos.

Hasta aquí se generan mediante un proceso sistematizado y de programación los diferentes escenarios posibles para caso de estudio propuesto.

Una vez que obtenemos la maqueta deseada para el escenario correspondiente se inicia el proceso de exportación de datos como una “mesh” de la volumetría generada. Se convierte a .FBX el archivo .UNITY mediante un software de conversión, para luego importar este archivo el software REVIT que realizará el cálculo de radiación con un plugin INSIGHT. Este último pasaje entre programas está en proceso de automatización mediante línea de comandos se espera poder programar y sistematizar el proceso de cálculo.

Dentro de REVIT – INSIGHT cargamos el escenario propuesto y seleccionamos allí la base de datos climático a utilizar, el tipo de salida de datos, unidades y configuración de escala gráfica. Procedemos al cálculo y obtenemos una imagen

degradada con escala gráfica correspondiente y el listado de datos calculados en forma de planillas para procesamiento posterior mediante programas de análisis gráficos o plantillas de cálculo como por ejemplo EXCEL.

## Resultados

En particular en este trabajo se toman tres escalas de estudio y su proyección en el tiempo para generar los diferentes escenarios: 1) Lote (Figura 1); 2) Manzana (Figura 2); 3) Cuadra (Figura 3); 4) Sector Ciudad (Figura 4).

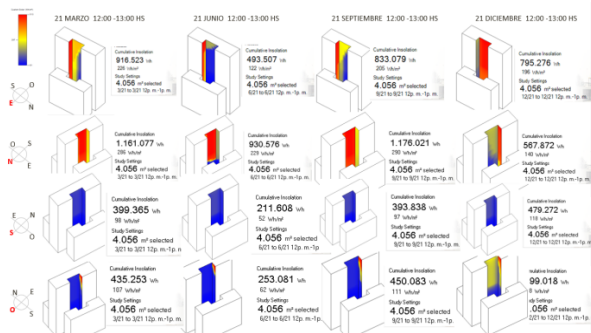


Figura 1. Caso de estudio por LOTE. Simulación de captación de radiación solar para 21 de marzo, 21 junio, 21 septiembre y 21 de diciembre en las 4 orientaciones, 12.00hs. Fuente: Propia, 2016.

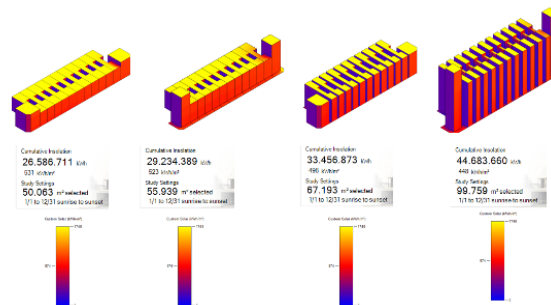


Figura 2. Caso de estudio por CUADRA. Simulación de captación de radiación solar anual para Escenarios 1,2,3,4 propuestos. Fuente: Propia, 2017.

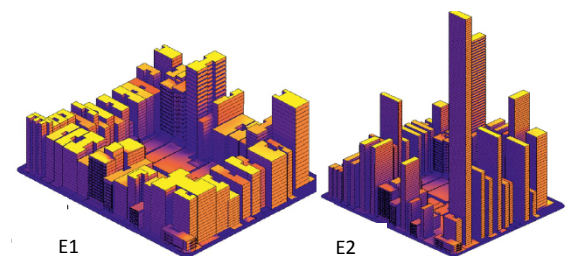


Figura 3. Caso de estudio por MANZANA. Simulación de captación de radiación solar anual para Escenario 1 – máxima superficie y mínima altura edificable - ; y Escenario 2 – mínima superficie y máxima altura edificable. Fuente: Propia, 2016.

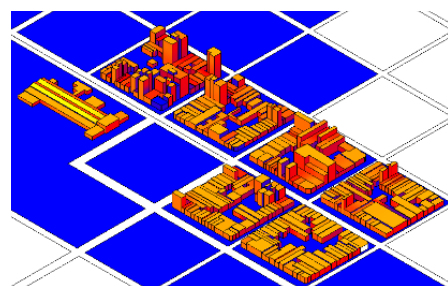


Figura 4. Caso de estudio SECTOR CIUDAD. Simulación de captación de radiación solar anual para área definida de San Miguel de Tucumán. Fuente: Propia, 2017.

Se plantean situaciones actuales y reales, confrontándolas con situaciones extremas de explotación de las posibilidades que brinda hoy el código urbano de SMT, donde se estudia el respeto de los edificios patrimoniales, en su relación con el entorno construido desde el punto de vista morfológico con un lenguaje formal compatible, sino también desde el respeto por el acceso a la luz natural en patios interiores.

Las siguientes variables se utilizan para definir las áreas de estudio:

### 1) Variables Urbanas:

- Forma (volumen) y la orientación.
- Calles, ancho.
- Distancia entre los edificios y calles.
- Reglamento Particular urbanos correspondientes a la zona, la viabilidad de los usos del suelo de acuerdo con las actividades.

### 2) Variables de Construcción:

- Diferentes factores urbanos: FOT (Factor de Ocupación Tierra), FOS (Factor de uso de la tierra), FAV (Factor Asoleamiento Volumétrico), FAU (Factor Asoleamiento Urbano), PAE (Potencial Área Energética), FF (Factor Forma). (De Schiller, S.; 2002).

Teniendo en cuenta las propuestas vigentes del Código de Planificación Urbano (CPU), se estudiaron dos posibles escenarios aplicados a las tres escalas de estudio: A) Máxima aérea de construcción por superficie y mínima altura edificable; B) Mínima aérea de construcción por superficie y máxima altura edificable.

### Caso de estudio 1. Lote.

Se plantea un proceso de simulación para estudiar diferentes escenarios sobre una misma fachada de edificio existente. Revisar cuáles son sus posibilidades reales de captación de radiación solar para una morfología determinada en las cuatro estaciones del año. Se confrontan dos escenarios sobre un mismo lote donde las morfologías resultantes son producto de la interpretación actual del código de planificación urbanos de SMT. Escenario 1 Lote (Figura 6):

edificio con máxima ocupación de la superficie del lote con patio interno entre medianeras y mínima altura edificable. Escenario 2 Lote (Figura7): edificio con mínima ocupación de la superficie del lote exento y máxima altura edificable.

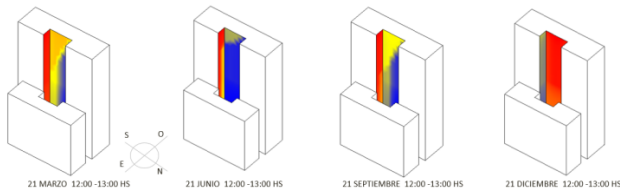


Figura 6. Escenario 1 Lote: edificio con máxima ocupación de la superficie del lote con patio interno entre medianeras y mínima altura edificable. Fuente: Propia, 2016.

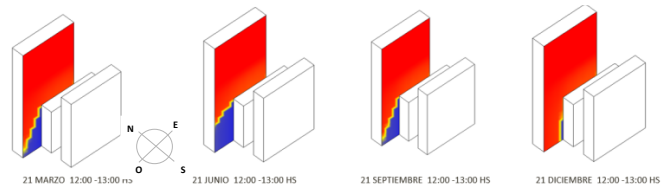


Figura 7. Escenario 2 Lote: edificio con mínima ocupación de la superficie del lote exento y máxima altura edificable. Fuente: Propia, 2016.

Tabla 22. Escenario 1 Lote. Fuente: elaboración propia, 2016.

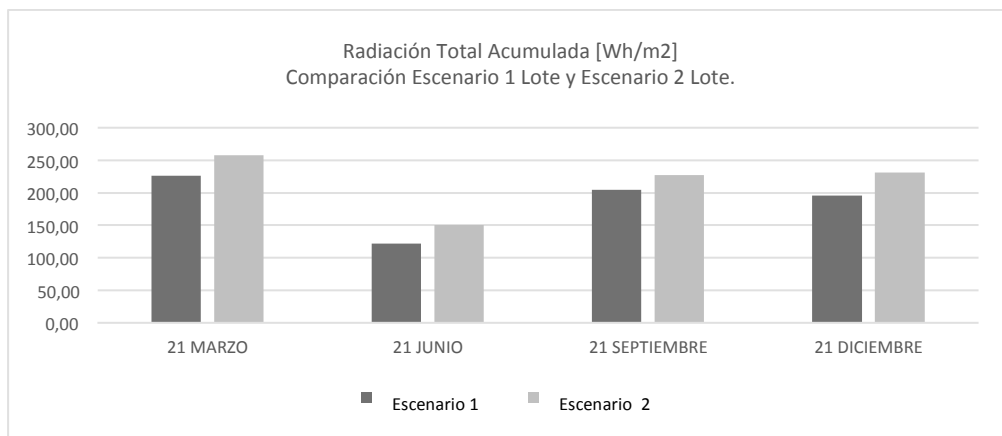
| Fecha           | Radiación Total Acumulada |              |
|-----------------|---------------------------|--------------|
|                 | [WH/m2]                   | [WH]         |
| 21-mar          | 226,00                    | 916.523,00   |
| 21-jun          | 122,00                    | 493.507,00   |
| 21-sep          | 205,00                    | 833.079,00   |
| 21-dic          | 196,00                    | 795.276,00   |
| TOTAL RADIACIÓN | 749,00                    | 3.038.385,00 |
| TOTAL ÁREA [M2] | 4.055,56                  |              |

Tabla 2. Escenario 2 Lote. Fuente: elaboración propia, 2016.

| Fecha           | Radiación Total Acumulada |               |
|-----------------|---------------------------|---------------|
|                 | [WH/m2]                   | [WH]          |
| 21-mar          | 258,00                    | 3.065.680,00  |
| 21-jun          | 150,00                    | 1.782.069,00  |
| 21-sep          | 227,00                    | 2.697.895,00  |
| 21-dic          | 231,00                    | 2.737.617,00  |
| TOTAL RADIACIÓN | 866,00                    | 10.283.261,00 |
| TOTAL ÁREA [M2] | 11.870,00                 |               |

En ambos escenarios E1L y E2L la simulación arroja que el período de mayor acceso de radiación solar es 21 de marzo, y el de menor acceso es el periodo invernal 21 de junio (Tabla 1 y 2). Para una misma orientación y época del año, la morfología es determinante en la accesibilidad solar, para todas las estaciones la morfología E2L supera en un 12.4% a la E1L (Gráfico 1).

Gráfico 23. Comparación Escenario 1 Lote y Escenario 2 Lote. Fuente: elaboración propia, 2016.



### Caso de estudio 2. Cuadra.

Para el caso dos el estudio de los diferentes escenarios sobre la morfología de una cuadra en base a modificaciones formales que permite el código de planificación. La simulación de captación de radiación solar es anual para Escenarios 1,2,3,4 propuestos. Se confrontan los escenarios propuestos para identificar cual es la alternativa morfológica que más se adapta a los requerimientos de asoleamiento y captación solar óptimos.

Se considera como área de estudio la zona R1 (residencial 1 del CPU). Casos: 1) entre medianeras; 2) Retiro 5m de frente; 3) Semi perímetro libre; 4) Perímetro libre; 5) Combinatoria casos 1,2,3,

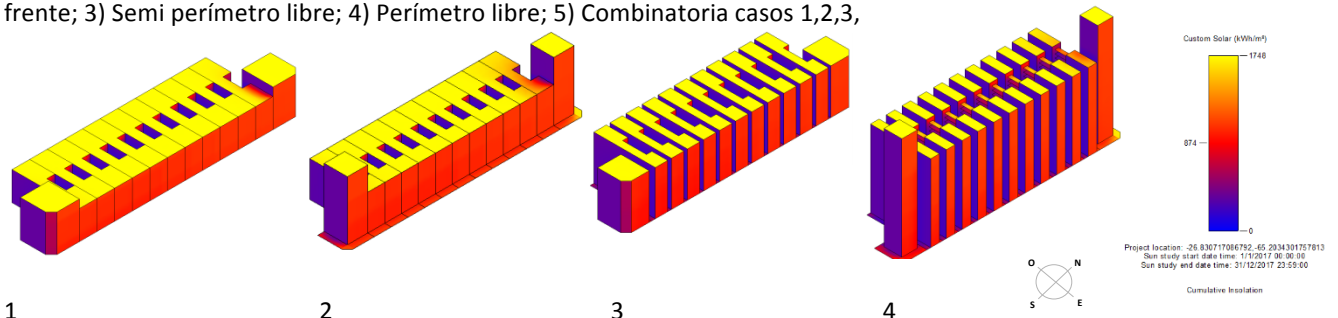
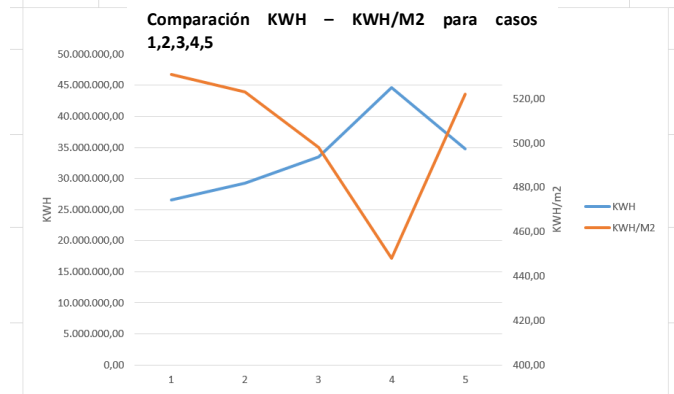


Figura 8. Casos: 1) entre medianeras; 2) Retiro 5m de frente; 3) Semi perímetro libre; 4) Perímetro libre. Fuente: Propia, 2017.

**Tabla 3.** Comparación Estudio CUADRA. Casos 1; 2; 3; 4; 5. Fuente: elaboración propia, 2017.

| Nº | Escenario | KWH           | M2        | KWH/M2 |
|----|-----------|---------------|-----------|--------|
| 1  |           | 26.586.711,00 | 50.063,00 | 531,00 |
| 2  |           | 29.234.398,00 | 55.939,00 | 523,00 |
| 3  |           | 33.456.873,00 | 67.193,00 | 498,00 |
| 4  |           | 44.683.660,00 | 99.759,00 | 448,00 |
| 5  |           | 34.787.554,00 | 66.590,00 | 522,00 |

**Gráfico 2.** Comparación Estudio CUADRA. Casos 1; 2; 3; 4; 5. Fuente: elaboración propia, 2017.



Tomando como base una cuadra, se desarrollan 5 casos de estudios que toman el máximo de área edificable en planta con mínima altura y se va disminuyendo esta relación hasta reducir al mínimo la ocupación del terreno y conseguir la máxima altura posible según las limitaciones del CPU SMT para restricciones de superficies, retiros y alturas; casos 1,2,3,4; el 5º caso es una combinatoria de los anteriores para simular una alternativa “realista”. (Tabla 3)

Notamos entonces que si bien al aumentar la superficie edificable M2, aumentan KWH; debido a las obstrucciones que los mismos volúmenes generan entre si la relación KWH/M2 disminuye a medida que aumentan los M2. (Gráfico2) es así que se busca una opción morfológica que combine las diversas situaciones para que regule estas obstrucciones y recomponga la relación KWH/M2. No siempre un edificio que tenga mayor superficie será óptimo para captación solar.

**Caso de estudio 3. Manzana – Sector Ciudad.**

El caso de estudio 3 corresponde al caso de estudio de simulación por MANZANA-SECTOR. Se realiza una simulación de captación de radiación solar anual para Escenario 1 – máxima superficie y mínima altura edificable - ; y Escenario 2 – mínima superficie y máxima altura edificable. Se confrontan los resultados para comparar e identificar cual es la alternativa formal que responde mejor a los fines de captación de radiación solar para potencial producción de energía limpia.

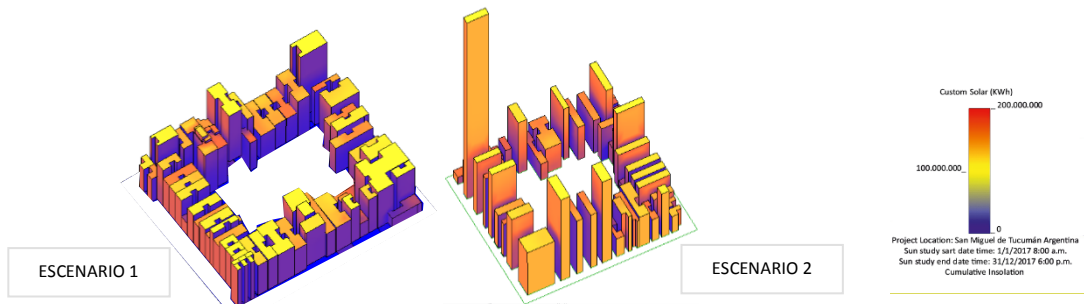



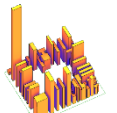
Figura 9. Caso de estudio por MANZANA. Simulación de captación de radiación solar anual para Escenario 1 – máxima superficie y mínima altura edificable - ; y Escenario 2 – mínima superficie y máxima altura edificable. Fuente: Propia, 2016.

Se consideran dos escenarios: Escenario 1) máxima superficie construida – mínima altura; Escenario 2) mínima superficie construida – máxima altura. Ambos basados en información base y predicciones supuestas a partir de datos reales de la ciudad de San Miguel de Tucumán y legislación actual del Código de Planificación Urbano actual.

Ambas propuestas son suposiciones límite de lo que potencialmente podría ocurrir de seguir con la normativa vigente. En base a estas modelizaciones se procede a cargar los datos geográficos y de clima. Luego se procede al cálculo de irradiación. Para este caso se considera un período desde el 1/01/2017 al 31/12/2017 con un rango horario de 8:00 am a 18:00 pm.

En cuanto al área en m2 considerada para ambos casos obtenemos que el E2 es un 14% mayor en superficie que el E1 (Tabla 4). Esta consideración se hace ya que, a mayor superficie, mayor cantidad de radiación acumulada puede obtenerse, pero deben considerarse las obstrucciones de la morfología de los edificios de cada una de las propuestas, siendo así que no siempre se cumple la condición de que, a mayor superficie, mayor irradiación acumulada. Al analizar los resultados por m2 el E2 supera en un 6% al E1 respecto de cantidad de radiación solar acumulada por m2. Podemos decir mediante estas comparaciones que para el caso estudiado el E2 supera al E1 en un 19% respecto de su capacidad de captación de radiación anual desde el punto de vista de la morfología.

Tabla 4. Comparación de Resultados de estudio Escenario 1 Y 2 Manzana valores de. Fuente: elaboración propia, 2017.

|                           | ESCENA   | Superficie [m2] | Valor Promedio Radiación solar | Valor total Radiación Solar |
|---------------------------|--|-----------------|--------------------------------|-----------------------------|
|                           |  |                 | [KWh/m2]                       | [WH]                        |
| ESCENA 1<br>Mínima altura |   | 506,116.57      | 224.34                         | 113,541,961.94              |
| ESCENA 2<br>Máxima altura |  | 587,776.40      | 238.53                         | 140,201,310.76              |
| Diferencias %             | -  | 13.89%          | 5.95%                          | 19.02%                      |

## Discusión y Conclusiones

El modo de habitar la tierra y la matriz energética mundial están cambiando. El uso y generación de energías renovables-limpias, es crucial para este cambio. La ciudad se encamina a ser un sistema sostenible en sí mismo.

El proceso hacia el desarrollo de energías renovables, limpias, como la captación solar, entre otras, es una solución factible, viable y a desarrollar para recurrir a la energía que la naturaleza nos brinda en el día a día.

Aprovechar este recurso natural será una de las pautas definitorias para el desarrollo de las políticas y toma de decisiones en la planificación de las ciudades, ya sea para adaptación de los territorios consolidados o de las nuevas extensiones urbanas. En ambos casos aprovechar el recurso de la radiación solar e iluminación natural, beneficia a todos los habitantes, tanto en aspectos económicos como de salubridad.

El planeamiento urbano debe ser el medio por el cual diseñadores, urbanistas, y arquitectos, solucionen situaciones urbanas conflictivas en pos del bienestar común y no sólo respondiendo a reglamentación y cumplimientos netamente de sentido legal, sino, por interés de la comunidad y la necesidad de atender los problemas urbanos para resolver las necesidades básicas de la población.

También es importante que los desarrolladores de bienes raíces estén bien informados sobre las últimas tecnologías y precios, ya que son un factor muy importante en el proceso de decisión. “En una situación ideal, un actor en el proceso de diseño debe realizar las simulaciones y cálculos sobre el potencial solar. La planificación urbana es un proceso en el que intervienen muchos factores. La energía solar es sólo uno de estos componentes que los planificadores urbanos tienen que tomar en cuenta. Los planificadores urbanos deben ser informados acerca de las consecuencias de la distribución de los bloques de edificios sobre el potencial de captación solar.” (Kanters & Horvat, 2012) El estudio del diseño arquitectónico y la planificación urbana reflejan en primera instancia, si hablamos de la morfología de la ciudad, la aplicación directa del estudio de posibilidades de diseño y soluciones de un muestrario de casos, para determinar cuál es el escenario que mejor se adapta al aprovechamiento, conservación y generación de energía.

El crecimiento excesivo e inevitable de las ciudades resulta, en la mayoría de las áreas centrales urbanas, en edificios de gran altura. Estos edificios reunirán: posibilidades de vivienda de alta densidad, y a su vez, limitaciones de acceso de luz natural en los pisos bajos de apartamentos y las cuestiones relacionadas con la explotación de la radiación solar para fines de energías renovables.

Notamos una gran carencia de áreas verdes en zonas urbanas, o bien, falta de condiciones de habitabilidad en los recintos de edificios, que lleva a la búsqueda de mejores condiciones ambientales hacia el exterior de los mismos, con esto se hace referencia a la falta de regulación sobre los patios de aire y luz, reglamentaciones sobre derecho a la luz y acceso a ella. A ello podríamos sumarles el estudio de fachadas y cubiertas de edificios para el aprovechamiento de energía limpia para consumo.

Reconocemos así una serie de dificultades no resueltas en la ciudad, que necesitan de la intervención de profesionales entendidos en el tema para poder subsanar estas carencias, producto de una alta densidad junto con el crecimiento poblacional, y una reglamentación pobre o mal implementada, que no permite un crecimiento urbano planificado y una eficiencia energética urbana adecuadas.

En síntesis, la Planificación Urbana, de cualquier ciudad, para poder optimizar sus recursos ambientales, económicos, políticos y de habitabilidad; debiera:

- Constar de un planteo consciente de la problemática urbana real.
- Interpretar la problemática de manera real, basados en la experiencia histórica.
- Reflejar el principio de solidaridad.
- Tener fundamentos teóricos – científicos probados y validados para la toma de decisiones.
- Claridad y facilidad de interpretación.
- Ser factible de llevarse a la práctica con todos los instrumentos de gestión y control necesarios articulados entre sí.
- Debe estar preparado para ser desarrollado y ejecutado con agilidad.
- Debe favorecer el bienestar general.
- Pensado para poner en práctica soluciones estratégicas.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Agencia Nacional para la promoción de la ciencia y la tecnología, el Consejo Nacional de Investigación y la Universidad de Tucumán, Argentina por su constante apoyo y financiamiento para este trabajo de investigación.

## Referencias

- Amado, M. P., The Operative process in Sustainable Urban Planning, in Sustainable Development and Planning II, A.G.Kungolos and others (eds): WIT Press, Vol. 1 (2005) pp. 181-191.
- De Schiller, S.; 2002. De Schiller, Silvia. "Transformación urbana y sustentabilidad"; publicación Revista Urbana; 2002.
- Kamal, M.; Smiriti, S 2014 emerging trends in tall buildings design. Environmental Sustainability through Renewable Energies Technology; Civil Engineering & Architecture Vol 2, N°3, pg 116-120.
- Kanters Jouri, Horvat Miljana. Solar energy as a design parameter in urban planning; Energy Procedia 30 (2012) 1143 – 1152; SHC 2012; www.sciencedirect.com.
- Lobaccaro Gabriele, Francesco Frontini; SHC 2013, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry September 23-25, 2013, Freiburg, Germany.
- Longhini, V & Ajmat, R., 2017; Architectural Morphology and potential use of renewable energy at urban and building scale. ISES Solar World Congress SWC 2017.
- Sauchelli M, Lobaccaro G, Masera G, Fiorito F, Smart (2013) Solutions for Solar Adaptive Façade Preliminary studies for an innovative shading device. Proceedings of the XIX IAHS World Congress, Milan, Italy, September 2013.

# Análisis de Capacidad y Madurez respecto del grado de confiabilidad de simulaciones energéticas de edificios.

## Wladimir Bugueño Callejas

Filiación: Académico de jornada Universidad Mayor  
Dirección: Av. Alemania 0281, CP 4801043. Temuco. Chile.  
Correo: Wladimir.bugueno@umayor.cl

## Danny Lobos Calquin

Filiación: Ph.D. Assoc. Prof., Universidad Tecnológica Metropolitana, Facultad de Ciencias de la Construcción y Ordenamiento Territorial  
Dirección: Calle Dieciocho 390, CP 8330526.Santiago, Chile  
Correo: danny.lobosc@utem.cl

### Manuscript Code

### Date of Acceptance/Reception

### Resumen

El nivel de madurez y capacidad BIM de una empresa son parámetros que se asocian directamente a su calidad y experiencia, y que, en la especialidad de simulación de desempeño energético, pueden determinar el nivel de confiabilidad de los resultados. En la realidad chilena, en ausencia de códigos, estándares o normativas de simulación energética, es de vital importancia contar con una estrategia que pueda ser precisa en sus predicciones respecto del desempeño energético. Este estudio se centra en determinar dicho nivel de incertidumbre por medio del análisis de diferentes empresas especializadas en este ámbito, revisando su nivel de experiencia y sus capacidades internas. Los resultados muestran que el nivel de confiabilidad aumenta conforme aumenta la madurez de la empresa, al mismo tiempo que se asegura un buen nivel de desempeño cuando existen procedimientos objetivos que fundamenten las capacidades internas, de modo que los máximos niveles de predictibilidad se alcanzan cuando se trabaja en un entorno integrado complementado con un sistema de aseguramiento de calidad, o bien, con un entorno gestionado incorporando protocolos de Certificación sustentable a nivel nacional. Se espera que esta herramienta pueda prestar una referencia a los mandantes de edificios en la etapa de anteproyecto, de modo que se pueda conocer los resultados de una simulación en función de la calidad y experiencia del especialista.

**Palabras claves:** Madurez, Capacidad, Simulación energética de edificios, desempeño energético.

## Introducción

El nivel de madurez y capacidad BIM de una empresa son parámetros que se asocian directamente a su calidad y experiencia. En lo que respecta a una especialidad como la simulación de desempeño energético, estos parámetros pueden determinar el nivel de confiabilidad con el que se obtienen resultados en proyectos determinados. En la realidad chilena, en ausencia de códigos, estándares o normativas de simulación energética, que introduzcan límites referenciales y supuestos homologables entre los diferentes softwares, especialistas, tipos de edificios, entre otros, es de vital importancia contar con una estrategia que pueda ser precisa en sus predicciones respecto del desempeño energético obtenido a través de un análisis mediante modelaciones y simulaciones con herramientas especializadas.

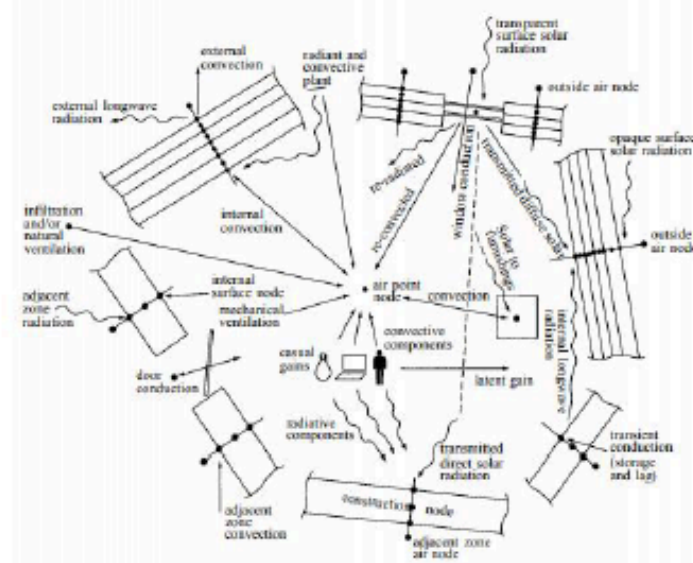
Para el caso del entorno BIM, en donde es posible contar con un núcleo centralizado de información, en el cual se puede alojar toda la información necesaria para realizar este tipo de análisis, podría ser posible determinar el alcance definitivo de una simulación energética en función de la calidad y experiencia de la empresa, es decir, en función de su capacidad y madurez, pudiendo comprometer, o incluso garantizar resultados reales de desempeño energético tomando como punto de partida el estado de la empresa en una matriz de madurez. Este mismo análisis puede llevar, asimismo, a la determinación de un grado óptimo de madurez y capacidad BIM para la especialidad de diseño bioclimático o eficiencia energética de un edificio, identificando, el que no necesariamente se alcanza en los grados más elevados de la matriz de Madurez BIM propuesta por Succar (2011), que considera un grado de madurez "Optimizado" junto a un nivel de capacidad de "Integración basada en un trabajo en Red" como máximo nivel posible.

Por medio de este estudio, se busca establecer cuál es la dependencia de los resultados finales de la simulación energética de un proyecto, en relación a su desempeño real, tomando como base de análisis los niveles de capacidad y madurez del especialista que realiza el estudio o consultoría.



Los sistemas de simulación energética de edificios permiten analizar la calidad y demanda ambiental de las construcciones, pero deben contar con procedimientos fiables y pertinentes (García-Alvarado, González, Bustamante, Bobadilla, & Muñoz, 2014). En su calidad de estudios teóricos, tienen la facultad de presentar una aproximación a al desempeño real que tendrá el edificio en uso. Dentro de las diversas variables que pueden generar incertidumbre en los resultados podemos mencionar (Coakley, Raftery, & Keane, 2014): Especificación de materialidades o condiciones internas, errores de modelación, errores numéricos y errores en los escenarios supuestos. En cada caso es posible encontrar diversas fuentes de variabilidad para los resultados finales, los más importantes demanda y consumo energético, junto con las condiciones de confort para los usuarios. En términos generales, un proceso de simulación energética busca evaluar el desempeño teórico de un edificio analizando un año completo de funcionamiento, incorporando variables como antecedentes climáticos (temperatura del aire, humedad relative, radiación solar, velocidad del viento), condiciones de uso (horarios, número de habitantes, tipo de usuarios), características constructivas (Trebilcock, Burdiles, & Fissore, 2001), entre otros, dando cuenta de un entorno complejo bajo el cual se parametriza la información geométrica y constructiva, agregando además un sinfín de supuestos que permitan alcanzar una estimación del comportamiento final del edificio en términos energéticos.

Figura 1. Flujos de la energía en edificios. Fuente: (Energy Simulation in Building Design, 2001).



La especialidad de eficiencia energética o análisis bioclimático carece en el país de una normativa que establezca procedimientos para se ejecutada, en una industria donde existen más de mil especialistas (considerando empresas y consultores independientes) esto no hace más que mermar la universalidad y estandarización de los resultados obtenidos por cada especialista para cada estudio. Si se considera además que, a diferencia de otras especialidades predictivas, como la mecánica de suelos, o los análisis estructurales, donde junto con la ingeniería (regulada normativamente) existe una serie de requerimientos legales (ensayos de terreno) a ser cumplidos exhaustivamente por el ejecutor del proyecto, y que por lo tanto complementan y justifican dichos estudios, en la especialidad de eficiencia energética no se cuenta con una segunda instancia que obligue al constructor (quien ejecuta la obra) a corroborar algún parámetro que haya sido simulado o supuesto en la etapa de ingeniería, y por tanto, la confiabilidad de los resultados de esta última resulta improbable a nivel de requerimientos normativos.

**Tabla 1: Presencia de las áreas BIM/BPS/BEAM en Chile. Fuente: (Lobos, 2014)**

| Rubro  | Ejemplos   |
|--|--|
| <b>BIM</b><br>Proyectos privados de Arquitectura, Construcción e Ingeniería que has usado BIM  | <p>TORRE DE CENTENARIO (Norma L1K 2002, Lema-Architectos, USACH)</p> <p>MUSEO DEL AMANECER (Arquitectos)</p> <p>EDIFICIO SUELO (Arquitectos)</p> <p>MUSEO DEL AMANECER (Arquitectos)</p> <p>MUSEO DEL AMANECER (Arquitectos)</p> <p>CONSTRUCCION CENTER (Planif. Logos y Planets)</p> <p>CEDIFICIO PRIVADO (CRUZ Y DURIA)</p> <p>Metro L10</p> |
| Edificios Públicos (MOP) que han pedido BIM y TDR-BIM MOP 2013                                 | <p>1990: Microstation as standard in MCP</p> <p>2012: BENSAL: BIM in Hospitals</p> <p>2013: TDR Regional del Estado Pardo</p> <p>2014: TDR MOP 2014, First Chilean BIM Standard (TDR BIM v1.0)</p> <p>SMM Centro Cultural Gabriela Mistral</p> <p>INQ: Análisis Inspección Orienta</p> <p>PCI: Puente Canal de Chanco</p>                      |
| <b>BPS</b><br>Ejemplos de edificios que han sido calculados con diversos software BPS en Chile | <p>Design Builder IES_VE</p> <p>Design Builder</p> <p>Design Builder</p>   |
| <b>BEAM</b><br>LEED Ejemplos de edificios que cuentan con certificación LEED en Chile          | <p>TITANIUM LA PORTADA</p> <p>UNIVERSIDAD DIEGO PORTALES</p> <p>ALTO DEL GOLF</p>  |
| CES Ejemplos de edificios que cuentan con certificación CES en Chile                           | <p>EDIFICIO PDI PUERTO MONTT</p> <p>EDIFICIO CORPORATIVO TRANSOCÉANICA</p> <p>EDIFICIO BUDIC UC SAN BERNARDO</p> <p>SUCURSAL BIO VITACURA ORIENTE</p> <p>JURGAPO DE FAMILIA VORRELL</p> <p>CESFAM DE CASTRO</p>  |

Por su parte, como ha ocurrido en la industria desde el año 2000 aproximadamente, existen diversas metodologías que permiten a las empresas de ingeniería asegurar calidad en su trabajo, como lo son los Sistemas de Aseguramiento de Calidad (2008), donde se menciona el más conocido asociado a las normas ISO9001, pero también existen otros Sistemas de Certificación que permiten asegurar la calidad del trabajo junto con una validación técnica externa para especialidades específicas, en este caso los Sistemas de Certificación de Edificios (Building Environmental Assessment Method), donde se puede mencionar en el ámbito internacional a los Sistemas LEED o PassiveHouse, y en el nacional, al Sistema de Certificación de Edificio Sustentable, o al futuro Sistema de Certificación de Vivienda Sustentable. Todos estos voluntarios, y por tanto, dependen de un esfuerzo realizado por cada compañía para destacar su marca y otorgar a su servicio un factor de diferenciación en el mercado de la construcción. Algunos ejemplos de estas iniciativas pueden encontrarse en la Tabla 1.

## Metodología

### Madurez y Capacidad BIM

Es posible determinar el desempeño de una compañía tomando como punto de partida sus capacidades BIM, es decir, el enfoque y nivel de integración en el uso de esta plataforma a partir de la cual es realizado el trabajo en la cadena de especialidades, asociando luego esta partida a la madurez de la empresa, asociada a la gestión de sus procesos y al nivel

de desarrollo de su trabajo interno (Succar, Williams , & Sher, 2012). A partir de esta tesis, Succar desarrolla un Índice de Madurez BIM (Succar B. , 2013). Este enfoque es utilizado en el estudio para determinar la confiabilidad de los resultados obtenibles por diferentes empresas de consultoría o consultores independientes que realizan servicios de la especialidad de Eficiencia Energética. Así, surge la propuesta que derivar la Matriz BIM de Succar en una Matriz subsecuente que permita determinar el grado de confianza o certidumbre que puede alcanzar una consultoría basándose en sus capacidades y procedimientos internos.

Tabla 2. Extracto de Matriz de Capacidad y Madurez BIM. Fuente: Succar 2012.

| Áreas de Madurez o Capacidades nivel 3   | a INICIAL<br>(a puntos)  | b DEFINIDO<br>(max 30 puntos)  | c GESTIONADO<br>(max 30 puntos)  | d INTEGRADO<br>(max 30 puntos)   | e OPTIMIZADO<br>(max 30 puntos)   |
|--|--|--|--|--|---|
| <b>ETAPA 1</b><br>Modelado basado en objetos: uso en una sola disciplina en una fase del ciclo de vida   | Implementación de una nomenclatura basada en objetos. No se identifican cambios de proceso o en las políticas para acompañar esta implementación.  | Se han acabado los proyectos piloto. Se identifican los requisitos del proceso y de la política BIM. Se prepara la estrategia de implementación y los planes de detalle.   | Se instalan, estandarizan y controlan los procesos y la política BIM.  | Las tecnologías, procesos y política BIM están integradas en las estrategias de organización y alineadas con los objetivos de negocio.   | Las tecnologías, procesos y política BIM se revisan continuamente para beneficiarse de la innovación y alcanzar los objetivos de desempeño más altos.   |
| <b>ETAPA 2</b><br>Colaboración basada en el Modelo multi-disciplinar: intercambio por la vía rápida de modelos   | Colaboración Ad-hoc BIM. Las capacidades internas de colaboración son incompatibles con los socios del proyecto. Puede faltar confianza y respeto entre los participantes en el proyecto.  | Colaboración BIM uno a uno, bien definida todavía reactiva. Hay señales identificables de la confianza mutua y el respeto entre los participantes del proyecto.  | Colaboración proactiva entre las múltiples partes: los protocolos están bien documentados y gestionados. Existe confianza mutua, respeto y riesgos y beneficios compartidos entre los participantes del proyecto.  | Colaboración entre las múltiples partes que incluye a los actores aguas abajo. Se caracteriza por la participación de los actores clave durante las fases iniciales del ciclo de vida del proyecto.  | Equipo integrado por múltiples partes que incluye a todos los actores clave en un entorno caracterizado por la buena voluntad, la confianza y el respeto.   |
| <b>ETAPA 3</b><br>Integración basada en la red: intercambio interdisciplinario de modelos de nD a lo largo de las Fases del Ciclo de Vida del Proyecto | Los modelos integrados son generados por una serie limitada de participantes en el proyecto - posiblemente bajo banners corporativos. La integración se produce con guías de proceso, normas o protocolos de intercambio poco o no pre-definidos. No hay una propuesta formal de las funciones y responsabilidades de los participantes. | Los modelos integrados son generados por un gran subconjunto de los participantes en el proyecto. La integración sigue guías de proceso, normas y protocolos de intercambio pre-definidos. Se distribuyen las responsabilidades y los riesgos se mitigan a través de medios contractuales. | Los modelos integrados lo partes del son generados y gestionados por la mayoría de los participantes en el proyecto. Las responsabilidades dentro de alianzas temporales de proyecto o asociaciones a más largo plazo son claras. Los riesgos y beneficios se gestionan y distribuyen de forma activa. | Los modelos integrados son generados y gestionados por todos los participantes clave del proyecto. La integración basada en la red es la norma y el foco no está en la forma de integrar modelos / flujos de trabajo, sino en la detección y resolución proactiva de los desajustes de tecnología, procesos y políticas. | Se revisa y optimiza continuamente la integración de modelos y flujos de trabajo. Un equipo de proyecto interdisciplinar, estrechamente unido, parague de forma activa nuevas eficiencias, entregables y alineaciones. Los modelos integrados son resultado de la aportación de muchos participantes en la cadena de suministro de la construcción. |

**Matriz de madurez y capacidad para BIM-BPS**

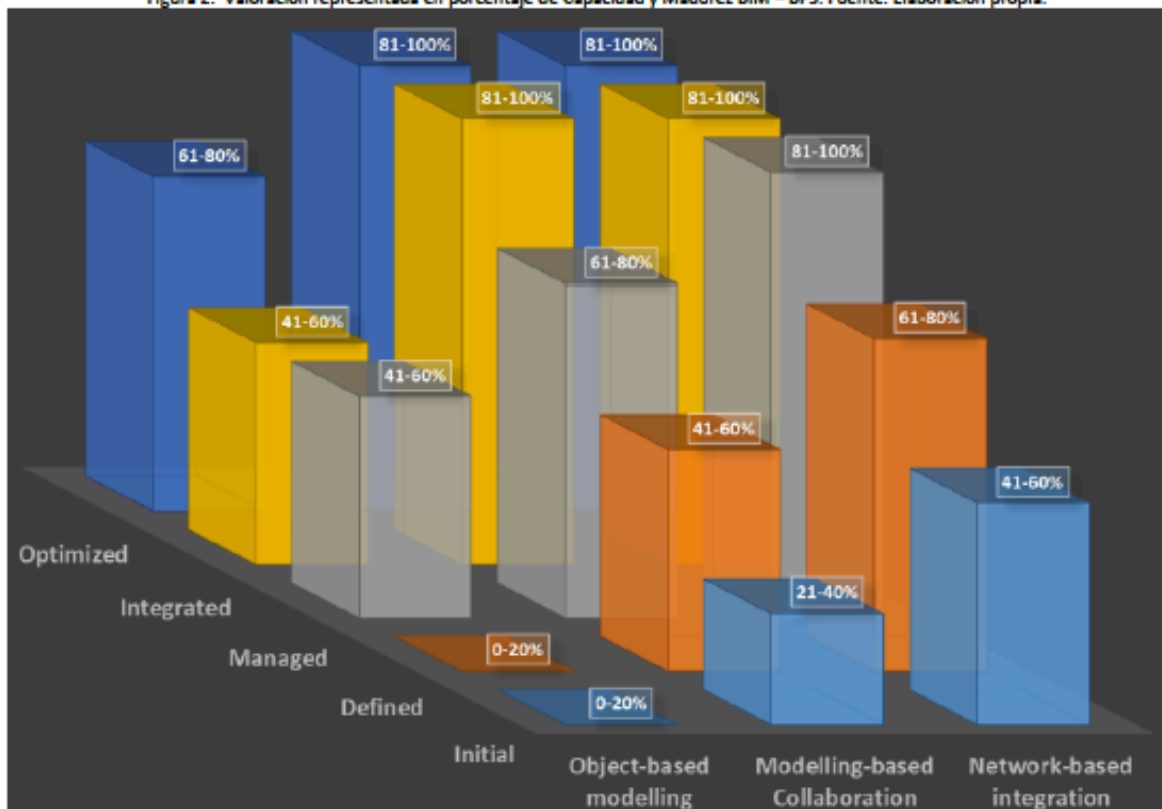
Se utiliza como referencia el Índice de Madurez desarrollado por Succar para determinar el estado de madurez y capacidad BIM que presenta una empresa, y que permite comprar los rendimientos, calidad y experiencia de diferentes compañías que realizan un mismo servicio. Para esto se propone identificar como capacidades propias de cada compañía en función del tipo de información que es modelada en cada caso. Para el entorno BIM, se presentan en la tabla 3 las 3 opciones identificadas por Succar, y se asigna, según el grado de Madurez de la empresa, un puntaje en una escala del 1 al 5 (Bugueño, 2017).

Tabla 3. Matriz de madurez y capacidad para BIM-BPS. Fuente: Elaboración propia.

| Capacidad                        | Índice de Madurez |          |            |           |            |
|----------------------------------|-------------------|----------|------------|-----------|------------|
|                                  | Inicial           | Definido | Gestionado | Integrado | Optimizado |
| Modelación basada en el objeto   | 1                 | 2        | 3          | 3         | 4          |
| Colaboración basada en el modelo | 2                 | 3        | 4          | 5         | 5          |
| Integración basada en la red     | 3                 | 4        | 5          | 5         | 5          |

De los puntajes asignados, se propone una escala de valoración representada en porcentaje, lo que indica el nivel de certidumbre o confiabilidad de los resultados del trabajo en cada caso, como se ve en la siguiente figura:

Figura 2: Valoración representada en porcentaje de Capacidad y Madurez BIM – BPS. Fuente: Elaboración propia.



Por su parte, debido al problema planteado en este estudio, respecto a la inexistencia de normativa asociada a esta especialidad, se toma como puntos de partida objetivos, y de posterior comparación, cinco elementos de Capacidad, extendiendo este último término de su definición inicial propuesta, y derivándolo directamente hacia las capacidades internas de una empresa que inciden (de manera teórica) en el nivel de incertidumbre de los resultados de análisis de simulaciones energéticas, estos cinco niveles son:

- **Ningún Sistema:** Se refiere a la inexistencia de procedimientos o protocolos para llevar a cabo una simulación energética, atendiendo a los requerimientos de cada cliente de manera personalizada y sin una directriz que permita obtener resultados comparables entre diferentes consultorías.
- **Declaración de adhesión a normativa extranjera:** Entendido como un esfuerzo de la compañía por obtener resultados comparables y validados técnicamente. Se pueden mencionar en este punto protocolos de trabajo como los definidos en ASHRAE<sup>1</sup>. Estos protocolos se detallan explícitamente para el desarrollo de la especialidad de simulación energética, y buscan ser una guía para el especialista que lleva a cabo la consultoría. Sin embargo, el trabajo realizado bajo este tipo de normativas no está creditado por una entidad nacional.
- **Sistema de aseguramiento de calidad:** Procedimientos de trabajo genéricos que pueden ser aplicados a cualquier compañía y que no tienen que ver directamente con la especialidad de eficiencia energética o simulación. Los más conocidos corresponden a las normativas ISO<sup>2</sup>. El nivel de incidencia que tiene esta certificación en los procedimientos internos obliga al especialista a llevar una serie de actividades que aseguren la calidad final del trabajo. Como punto diferenciador, para acreditarse para esta norma, es necesario realizar auditorías de trabajo por una entidad externa autorizada por el Instituto Nacional de Normalización.
- **Sistema de Certificación Internacional:** Comúnmente conocidos por representar un factor de diferenciación para grandes proyectos de construcción en el ámbito de la eficiencia energética o construcción sostenible.

<sup>1</sup> Ashrae 209-2018, "Diseño asistido por simulación energética para edificios excepto edificios residenciales de baja altura".

<sup>2</sup> ISO 9001.2015. Requisitos para un Sistema de Gestión de Calidad.

Dentro de los más utilizados a nivel mundial podemos encontrar a PassiveHouse<sup>3</sup> o LEED<sup>4</sup>. Este último utiliza dentro de sus requerimientos para simulaciones energéticas contempla el uso de requerimientos como ASHRAE, y el trabajo es validado y acreditado por una entidad internacional (Green Building Council).

- Sistema de Certificación Nacional: Como estructura de Sistema de Certificación tienden a ser muy similares a los sistemas extranjeros, sin embargo, tienen la ventaja de que incorporan parámetros y variables solo aplicables al plano nacional, por lo que el grado de confiabilidad de los resultados aumenta, debido a los requerimientos específicos y condiciones territoriales particulares con las que se debe cumplir. En este caso existen en Chile dos Sistemas, la Certificación de Edificio Sustentable<sup>5</sup> y la Calificación Energética de Vivienda<sup>6</sup>.

En este estudio se utilizan estos cinco niveles de capacidad para homologar los desarrollados por Succar, definiendo en cada nivel, en función del grado de madurez de la compañía, una asignación de puntaje en una escala valorada del 1 al 7.

## Resultados

En la definición de cada grado de cumplimiento se asocia el nivel de certidumbre que las diferentes capacidades constituyen para un estudio de simulación energética, tomando como base la información declarada por cada compañía, y la característica propia de los Sistemas de trabajo asociadas a dichas capacidades, obteniendo lo siguiente:

Tabla 4: Indicador de Certidumbre asociado a las capacidades en el ámbito de la especialidad de simulación energética. Fuente: Elaboración propia.

|  | Nivel de Certidumbre |         |         |            |           |
|--|----------------------|---------|---------|------------|-----------|
|  | Initial              | Defined | Managed | Integrated | Optimized |
| Ningún sistema                                 | 15%                  | 30%     | 45%     | 60%        | 75%       |
| Declaración de adhesión a normativa extranjera | 30%                  | 45%     | 60%     | 75%        | 90%       |
| Sistema de aseguramiento de calidad            | 45%                  | 60%     | 90%     | 100%       | 100%      |
| Sistema de Certificación Internacional         | 60%                  | 60%     | 90%     | 100%       | 100%      |
| Sistema de Certificación nacional              | 60%                  | 75%     | 100%    | 100%       | 100%      |

De esta manera, se determina el nivel óptimo que permite asegurar un grado de confiabilidad en el tramo más alto de la escala de valores (91-100%), el que puede ser obtenido en 7 escenarios distintos, ver figura 3.

Esto determina que las capacidades mínimas de una empresa para ser considerada dentro del tramo más alto de confiabilidad, cuyo estado de madurez es Gestionado (Managed), deben incorporar la acreditación de sus procedimientos a un Sistema de Certificación Sustentable a nivel nacional. O bien, si la empresa se encuentra en el nivel Integrado (Integrated), es suficiente con incorporar a sus procedimientos internos de trabajo un Sistema de Aseguramiento de la Calidad, cuyos requerimientos deben ser acreditados por una entidad externa que permita validar las actividades y procesos de la compañía.

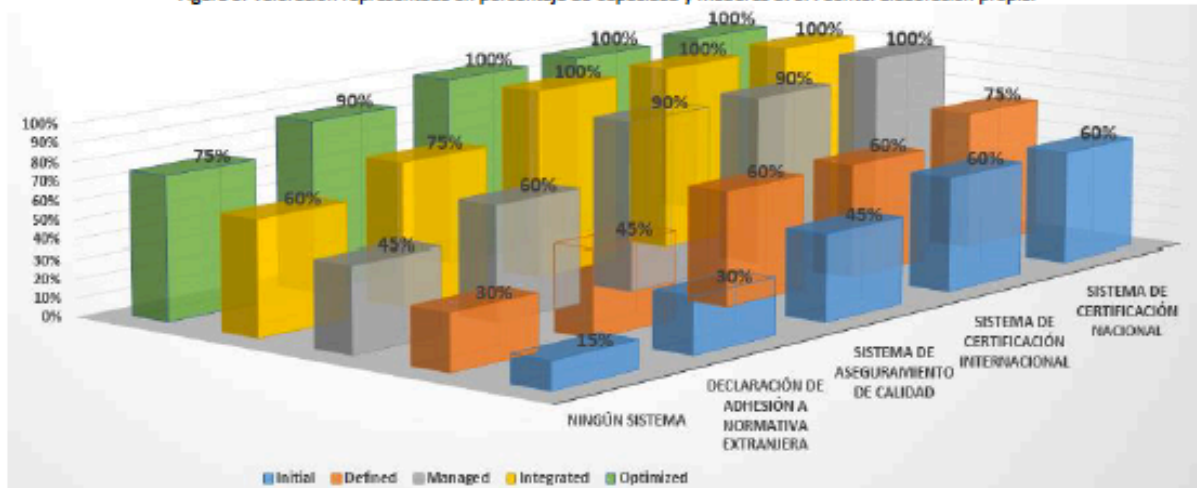
<sup>3</sup> Passivehouse: Estándar de origen alemán para la construcción y certificación de viviendas que cuenten con un clima interior confortable. <http://passivhaus-chile.cl/>

<sup>4</sup> LEED: Leadership in Energy & Environmental Design, es un sistema de certificación de edificios sostenibles, desarrollado por el US Green Building Council. <http://www.chilegbc.cl>

<sup>5</sup> CES: La Certificación Edificio Sustentable es un sistema nacional que permite evaluar, calificar y certificar el comportamiento ambiental de edificios de uso público en Chile. <http://www.certificacionsustentable.cl/>

<sup>6</sup> CEV: La Calificación Energética de Viviendas en Chile es un instrumento diseñado el año 2012 que busca mejorar la calidad de vida de las familias, a través de la entrega de información objetiva y estandarizada. <http://www.calificacionenergetica.cl/>

Figura 3. Valoración representada en porcentaje de Capacidad y Madurez BPS. Fuente: Elaboración propia.



## Discusión y Conclusiones

Los resultados muestran que el nivel de confiabilidad aumenta conforme aumenta la madurez de la empresa, al mismo tiempo que se asegura un buen nivel de desempeño cuando existen procedimientos objetivos que fundamenten las capacidades internas, de modo que los máximos niveles de predictibilidad se alcanzan cuando se trabaja en un entorno integrado complementado con un sistema de aseguramiento de calidad, o bien, con un entorno gestionado incorporando protocolos de Certificación Sustentable en el ámbito nacional.

Se espera que esta herramienta pueda prestar una referencia a los mandantes de edificios en la etapa de anteproyecto, de modo que se pueda conocer los resultados de una simulación en función de la calidad y experiencia del especialista. Por su parte se propone una temática de investigación que surge de este estudio y aborda la contrastación entre el nivel de confiabilidad de las simulaciones energéticas respecto de los consumos energéticos reales que presenta cada edificio.

## Agradecimientos

Programa: FONDECYT: Vinculación de modelos BIM (Building Information Modeling) y software BPS (Building Performance Simulation) a métodos de evaluación ambiental de edificios mediante innovación en la plataforma BIM.

## Referencias

- Bugueño, W. (2017). *Tesis para optar al grado de Magíster. Matriz de Madurez BIM aplicada a un proyecto hospitalario de Alta Complejidad*. Santiago, Chile.
- Clarke, J. A. (2001). *Energy Simulation in Building Design*. New York, USA: Routledge.
- Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37(123-141).
- García-Alvarado, R., González, A., Bustamante, W., Bobadilla, A., & Muñoz, C. (2014). Características relevantes de la simulación energética de viviendas unifamiliares. *Informes de la Construcción*, 66(533).
- Lobos, D. (2014). Interoperability Map between BIM and BPS Software. *International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, (págs. 601-608).
- MINVU. (s.f.). *Calificación Energética de Viviendas*. Obtenido de <http://www.calificacionenergetica.cl>
- Succar, B. (2013). Building Information Modelling Maturity Matrix. En G. a. Issa, *Handbook of Research on Building Information Modeling and Construction Informatics: Concepts and Technologies* (págs. 38-56).
- Succar, B., Williams, A., & Sher, W. (2012). Measuring BIM Performance: Five Metrics. *Architectural Engineering and Design Management*, 8(120-142).
- Trebilcock, M., Burdiles, R., & Fissore, A. (2001). La modelación y simulación energético-ambiental como herramienta de rediseño arquitectónico. *Congreso Sigrafi*, (págs. 83-86). Concepción.

# Modelación de la transferencia de calor y masa de muros vegetativos y validación en condiciones de clima semiárido

## Modeling of the heat and mass transfer of living walls and validation under semiarid climate conditions

**Mauricio García** (Autor principal)

Filiación: CEDEUS, Pontificia Universidad Católica de Chile  
Dirección: Av. Vicuña Mackena 4860, Macul, Santiago. CP: 7820436  
Correo: [magarcia2@uc.cl](mailto:magarcia2@uc.cl)

**Sergio Vera**

Filiación: CEDEUS, Pontificia Universidad Católica de Chile  
Dirección: Av. Vicuña Mackena 4860, Macul, Santiago. CP: 7820436  
Correo: [svera@ing.puc.cl](mailto:svera@ing.puc.cl)

**Fabien Rouault**

Filiación: Pontificia Universidad Católica de Chile  
Dirección: Av. Vicuña Mackena 4860, Macul, Santiago. CP: 7820436  
Correo: [frouault@uc.cl](mailto:frouault@uc.cl)

**Waldo Bustamante**

Filiación: CEDEUS, Pontificia Universidad Católica de Chile  
Dirección: Av. Vicuña Mackena 4860, Macul, Santiago. CP: 7820436  
Correo: [wbustamante@uc.cl](mailto:wbustamante@uc.cl)

Manuscript Code: 051

Date of Acceptance/Reception: 27-09-2018/24-08-2018

### Abstract

The high demand of energy for air conditioning of buildings makes necessary the development of technologies that mitigate its excessive consumption. The living walls represent a technology that needs to be evaluated. However, currently there is no a simulation tool validated in semiarid climate conditions (Santiago) and implemented in a building performance simulation software that models the complex exchanges of mass and energy of a living wall, which does not allow the designers to properly take decisions during the early design stage of buildings. Therefore, the objective of this research is the development of this tool in order to evaluate the influence of living walls on the sensible thermal loads of buildings. The methodology includes three stages: (1) schematizing the biophysical processes of interest to be modeled; (2) formulating the model of heat and mass transfer for living walls; (3) validating experimentally the numerical model. The results show that the main difference between modelling green roof and living walls corresponds to the convective heat transport and the absorption of short wave radiation of the substrate, so that the relevant adaptations of a green roof model are carried out. The experimental validation shows a good agreement between the simulated and measured temperatures for the canopy and substrate of the tested living wall. The root mean square deviation (RMSD) of substrate temperature vary between 1.9 and 2.5 °C for the months studied, which correspond to March, July, August, October and November 2017, and January 2018. Therefore, the main contribution of this research was the development of a validated heat and mass transfer numerical model of living walls for semiarid climates, which is capable of representing all the processes of mass and energy exchange of living walls and calculate the temperatures of both the foliage and the substrate.

**Keywords:** Living walls; Heat and mass transfer; Energy performance of buildings.

### Introducción

El desarrollo de la construcción de edificios en las grandes ciudades trae problemas de suministro de energía en función de sus necesidades. En cuanto al uso de la energía de los edificios en Chile, la mayor parte corresponde a los sistemas de climatización, en donde se alcanzan valores entre el 40 y el 65% del consumo total de energía de los edificios, según la Asociación Chilena de Eficiencia Energética (2016). Los muros vegetales surgen como una tecnología para mitigar el excesivo consumo energético de las edificaciones, en especial el uso de energía destinado a climatización. Sin embargo, para poder evaluar su impacto en el desempeño energético de los edificios, es necesario desarrollar una herramienta capaz de simular los intercambios de masa y energía que acontecen tanto en el mismo muro vegetal como en su interacción con el ambiente exterior. De esta manera, se puede calcular de forma numérica la temperatura de las plantas y, principalmente, la del sustrato, las que afectan las ganancias y pérdidas de calor a través del muro con vegetación, y que influyen en los consumos de energía de climatización de los edificios. Esto

surge debido a que, actualmente, ninguno de los modelos de muros vegetales existentes se encuentra validados para clima semiárido y, por otro lado, tampoco han sido implementados en un software de simulación energética que permita a los usuarios tener una amplia gama de opciones de diseño de este tipo de tecnologías y estudiar su influencia en el desempeño energético de los edificios.

La relevancia del desarrollo del modelo numérico de transferencia de calor y masa para muros vegetales consiste en la elaboración de una herramienta que sea capaz de calcular la temperatura del sustrato en todas sus capas, cuyo valor de mayor importancia corresponde a la temperatura de la última capa, ya que representará la condición de borde exterior del muro del edificio. De esta manera, se podrá estudiar la influencia de un muro vegetal en la temperatura exterior del muro del edificio al acoplar este modelo con una herramienta de simulación energética que permita calcular la temperatura al interior del edificio y analizar su impacto en las cargas térmicas y, por ende, en el desempeño energético de los edificios. Finalmente, también se busca crear una interfaz amigable al usuario, que permita a este evaluar diferentes condiciones y parámetros de diseño de los muros vegetales.

De esta manera, el objetivo principal de esta investigación consiste en desarrollar un modelo numérico de la transferencia de calor y masa de los muros vegetativos, además de la validación experimental del modelo desarrollado en condiciones de clima semiárido.

## Estado del arte del problema

Actualmente, hay autores que han trabajado en la caracterización de los procesos biofísicos que ocurren en las cubiertas vegetales, tales como: radiación solar, radiación de onda larga, evapotranspiración, convección y conducción. En específico, existen modelos numéricos en los cuales, mediante ecuaciones, se estudian los balances de energía del sistema. Dentro de los modelos desarrollados para estudiar los muros vegetales, se encuentra el realizado por Malys et al. (2014), quienes elaboraron un modelo hidrotérmico que luego fue incluido en un software de simulación de microclimas llamado SOLENE-microclimates. En dicho modelo, se realiza un balance general de masa y energía, en donde incluyen los fenómenos de radiación, evapotranspiración y calor sensible. Sus resultados fueron la obtención de buenas representaciones de las temperaturas tanto del follaje como del sustrato. Sin embargo, el modelo no logra representar bien los procesos de evapotranspiración, argumentando que tiene deficiencias en modelar ciertos aspectos relacionados a las plantas.

Otro modelo, esta vez desarrollado por Scarpa et al. (2016), fue realizado con objeto de predecir el comportamiento térmico de muros vegetales en clima mediterráneo, en Italia. Sus resultados muestran una buena estimación de las temperaturas y los flujos de calor involucrados en el sistema. El modelo más actual fue desarrollado por He et al. (2017), el cual fue elaborado para evaluar el rendimiento energético de edificios ubicados en Shangai (China), ciudad que posee un clima templado. Sus resultados muestran buenas estimaciones de las variaciones de temperatura y humedad. A pesar de los correctos resultados simulados, los autores indican algunos problemas del modelo, como la falta de incorporación de los procesos de absorción de agua del sustrato por parte de las raíces de las plantas.

Ahora bien, a pesar de que existen modelos de transporte de calor y masa que poseen buenos resultados en cuanto al cálculo de las propiedades de interés, ninguno ha sido validado experimentalmente en las condiciones de clima semiárido (Santiago). Por otra parte, ninguno ha sido incorporado a una herramienta de simulación para investigar su impacto en el desempeño energético de las edificaciones.

## Metodología

La metodología a llevar a cabo consiste en tres etapas, cada una de las etapas tiene un objetivo específico que cumplir, de forma que en su conjunto logren responder al objetivo general de este estudio, que corresponde al desarrollo de una herramienta capaz de simular los intercambios de masa y energía, la que permita poder calcular de forma numérica tanto la temperatura de las plantas como la del sustrato de los muros vegetativos. Las etapas junto con sus respectivos objetivos se pueden apreciar en Tabla 1 y que se describen a continuación.

### Etapa I

Esta etapa se compone de una revisión bibliográfica la cual corresponde principalmente a la revisión de artículos científicos relacionados a la teoría de los procesos de transferencia de calor y masa. Se considera especial foco en los fenómenos de transporte, el clima y la biofísica ambiental. Lo anterior va de la mano con la revisión de literatura



relacionada a modelos numéricos de transferencia de calor y/o masa tanto de techos como muros vegetales. Luego, se realiza una esquematización de los procesos biofísicos. En cuanto a los modelos revisados, en este método el enfoque está en lo que compete a la modelación de los procesos de interés del muro y techo vegetal sobre la envolvente de un edificio, que corresponden a la absorción de radiación de onda corta, radiación de onda larga, evapotranspiración, transporte de calor por convección y conducción. Finalmente, se realiza una comparación de los modelos numéricos de muros y techos vegetativos. Se busca esquematizar ambos tipos de modelos, muros y techos, en cuanto a sus principales componentes de interés para la modelación mencionadas en el punto anterior, dado que son los conceptos de mayor influencia sobre la envolvente.

**Tabla 1.** Etapas de la metodología. Preparada por los autores, 2018.

| Etapa de metodología | Objetivo específico   |
|----------------------|---|
| Etapa I              | Esquematizar los procesos biofísicos que forman parte tanto de los sistemas de techos como de muros vegetales, de tal forma de establecer la diferencia entre ambos casos |
| Etapa II             | Formular un modelo de muros vegetales a partir de un modelo realizado para techos vegetales por Tabares et al. (2012).  |
| Etapa III            | Validar el modelo para muros vegetales desarrollado a partir de la adaptación de modelo de Tabares, con datos experimentales de laboratorio para muros vegetales          |

### Etapa II

En esta etapa se estudia un modelo de techos vegetales Tabares et al. (2012). Este modelo se encuentra validado para las condiciones climáticas semiáridas e implementado en el software Matlab lo cual fue desarrollado por Pinto (2017). Esto busca comprender su operación e implementación en este software de programación. Luego de comprender la operación del modelo, el siguiente paso consiste en mejorar la forma de su implementación, de tal manera de hacer más fácil su aplicación y también su rendimiento al momento de usarlo. Esto, enmarcado en poder obtener la mayor eficiencia de las funcionalidades del software Matlab. Posteriormente, se lleva a cabo la adaptación de ciertos procesos biofísicos y de transporte de calor, los cuales son distintos para el caso de los muros vegetales, de tal forma de desarrollar un modelo capaz de representar las principales variables de interés, como las temperaturas del follaje y sustrato y el contenido de humedad de este último para un muro vegetal.

### Etapa III

En esta etapa se lleva a cabo el monitoreo experimental de un muro vegetal en Laboratorio de Infraestructura Vegetal de Edificios (LIVE). En LIVE se adquieren datos en tiempo real para el muro vegetal mostrado en la Figura 1, tales como condiciones de temperatura y/o humedad del follaje y sustrato, como también las condiciones climáticas de interés para el modelo, como la temperatura del aire, viento (velocidad y dirección), radiación solar (directa y difusa) y radiación de onda larga. Algunos de estos datos son datos de entrada del modelo mientras que otros corresponden a los datos que se utilizarán para la validación. Se emplea el modelo para calcular las temperaturas del follaje y sustrato, de tal forma de comparar con los valores medidos en laboratorio en diferentes estaciones del año. Se utilizan dos criterios para la validación. El primero, corresponde al gráfico de dispersión, el cual corresponde al gráfico de la temperatura modelada versus la medida, tanto del follaje como de sustrato, en el cual se puede apreciar la distribución de los valores modelados respecto de los medidos y la tendencia de los resultados. El segundo criterio corresponde al cálculo de la desviación cuadrática media (RMSD, por sus siglas en inglés) de acuerdo a Ec. 1.

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{\text{modelado}} - x_{\text{medido}})^2}{n}} \quad (1)$$

Esta medida representa el promedio de las diferencias entre los valores medidos y modelados. Sus unidades son grados Celsius. Sirve para saber, en promedio, qué tan cercanos están los valores simulados respecto a los medidos experimentalmente.

Las simulaciones en el software Matlab para la validación del modelo se realizaron para datos experimentales de distintas épocas a lo largo del año. De esta manera, los intervalos de tiempo simulados para el 2017 corresponden, del 13 al 30 de julio, del 31 de julio al 30 de agosto, del 29 de septiembre al 30 de octubre. Mientras que para el 2018, se realizó una simulación entre el 19 y 29 de enero. Estas simulaciones entregan como output la temperatura del follaje y del sustrato del muro vegetal para intervalos de tiempo de 5 minutos.



Figura 1. Muro vegetal de macetas, laboratorio LIVE. Fuente: propia, 2018.

## Resultados

### Adaptación de modelo de techos a muros vegetales

Como resultado del estudio del modelo de Tabares et. al (2012), se determinó que las principales diferencias entre los procesos de transferencia de calor y masa para el caso de un techo en comparación a un muro vegetal, radican en el transporte de calor convectivo y la absorción de radiación de onda corta. Esto ocurre debido a que el modelo de techos vegetales basa el cálculo numérico del flujo convectivo entre el ambiente exterior y el techo vegetativo bajo el supuesto de que este último corresponde a una placa horizontal. Por ello, se modifica el cálculo del número adimensional de Nusselt (Nu) por el obtenido en un experimento realizado para placas verticales por Churchill (1977), en donde calcula Nu para los casos de convección forzada, así como convección natural para la tasa local de transferencia de calor, cuyas expresiones son:

$$\text{Nu}_{xF} = \frac{0,339\text{Re}^{1/2}\text{Pr}^{1/3}}{\left(1 + 2\left(\frac{0,0468}{\text{Pr}}\right)^{2/3}\right)^{1/4}} \quad \text{convección forzada (2)}$$

$$\text{Nu}_{xN} = \frac{0,503\text{Ra}^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0,0492}{\text{Pr}}\right)^{9/16}\right)^{4/9}} \quad \text{convección natural (3)}$$

$$\text{Nu}^n = \text{Nu}_F^n + \text{Nu}_N^n \quad \text{convección mixta (4)}$$

Donde Re y Pr corresponden a los números adimensionales de Reynolds y Prandtl, respectivamente. El factor n presente en la ecuación de convección mixta depende del tipo de superficie. Para placas verticales planas, el valor más aceptado, según los estudios experimentales de Churchill (1977), es de n = 3. Por otra parte, los rangos de número adimensional de Grashof (Gr) respecto a Re según los que se produce cada tipo de convección son distintos también. En base a los estudios de Chen et al. (1986b), el límite para los tres tipos de convección para placas verticales corresponde a:

$$\text{Gr}_x < 0,07\text{Re}_x^2 \quad \text{rango convección forzada (5)}$$

$$7,5\text{Re}_x^2 < \text{Gr}_x \quad \text{rango convección natural (6)}$$

$$0,07 < \text{Gr}_x/\text{Re}_x^2 < 7,5 \quad \text{rango convección mixta (7)}$$

Por otra parte, se tiene que la radiación solar incide de forma prácticamente nula sobre el sustrato, debido a la cobertura del follaje y por la posición vertical de este. En consecuencia, se asume que la radiación solar absorbida por el sustrato es igual a cero.

$$R_{sh,abs,sub} = \tau_{plants,solar}(1 - \rho_{substrate})R_{sh} = 0 \quad (8)$$

Todos estos cambios son aplicados sobre las ecuaciones planteadas por Tabares et. al (2012), de forma de representar los balances de energía para las condiciones de un muro vegetal.

### Validación experimental de la temperatura del follaje

En las Figuras 2 y 3 se pueden apreciar los resultados de las simulaciones realizadas para la temperatura del follaje. La Figura 2 muestra los datos para los meses cálidos (octubre de 2017 y enero de 2018), mientras que la Figura 3 corresponde a los meses fríos (julio y agosto de 2017). Se logra ver claramente una mejor correlación entre las temperatura simuladas y experimentales para los meses más cálidos en comparación a los meses más fríos. Estas diferencias para las temporadas de invierno y verano se pueden explicar, en parte, debido a que la radiación solar que incide directamente a las plantas disminuye en los meses de invierno, esto debido a la presencia de mayor cantidad de días nublados. La radiación posee un efecto en la apertura de los estomas, de tal forma que la planta tenderá a transpirar menos en invierno y a acumular más energía. Este hecho puede no estar siendo representado de forma suficientemente precisa en el modelo, lo que genera variaciones mayores en los resultados con respecto a las mediciones.

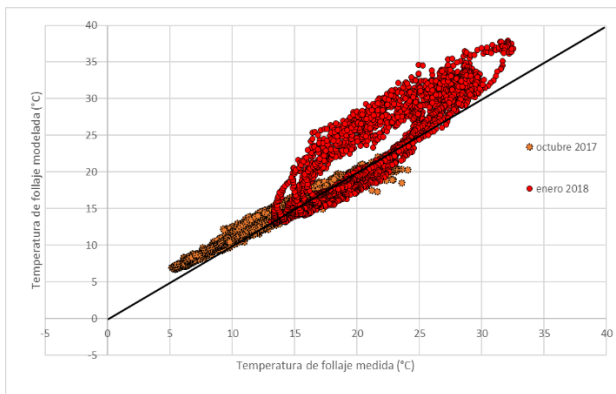


Figura 27. Correlación de resultados para temperatura del follaje en meses cálidos.

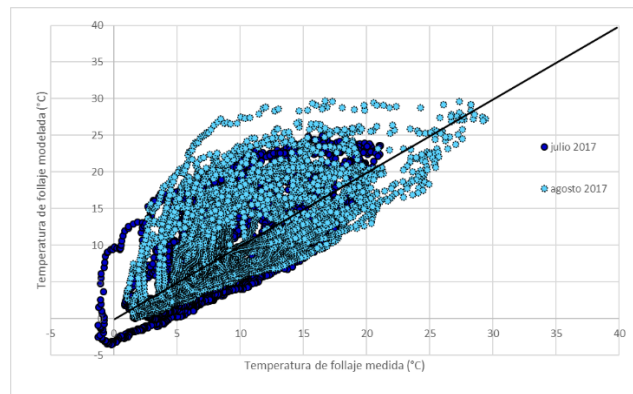


Figura 3. Correlación de resultados para temperatura del follaje en meses fríos.

Al analizar la comparativa entre las temperaturas simuladas versus las medidas para todos los meses estudiados, es posible notar que hay algunos meses con mejores resultados que otros. Por ello, cabe destacar en cuanto a la simulación de la temperatura del follaje, al mes de octubre, debido a que presenta una mejor correlación que los demás meses; lo que se puede apreciar con claridad en la Figura 4, donde se muestran las temperaturas simuladas y medidas para el mes de octubre versus el tiempo. La Figura 4 muestra solamente la primera semana de octubre, la cual posee el mejor RMSD, el cual corresponde a a 1.06°C. Es importante destacar que octubre representa un mes de estación media. Por otra parte, los resultados más lejanos a los reales para la temperatura del follaje se presentan en el mes de julio (Figura 5), donde se alcanza un RMSD de 5.25°C, lo que implica que los valores no son muy cercanos a los medidos.

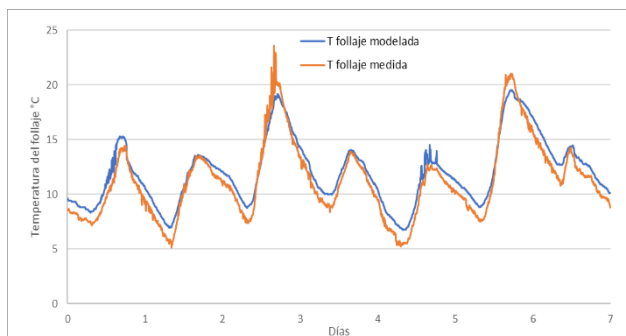


Figura 4. Resultados simulación temperatura del follaje entre el 1 y el 7 de octubre de 2017. Preparado por los autores, 2018.

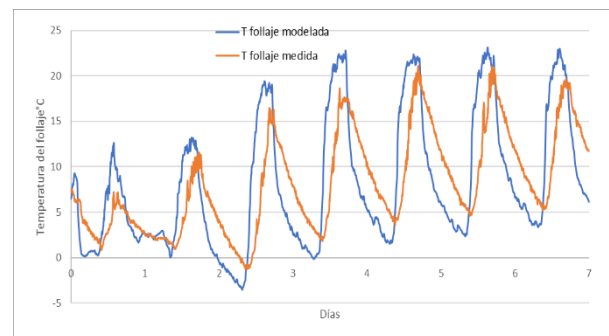


Figura 5. Resultados simulación temperatura del follaje entre el 15 y el 21 de julio de 2017. Preparado por los autores, 2018.

### Validación experimental de la temperature del sustrato

Las Figuras 6 y 7 muestran una mejor correlación entre las temperaturas de sustrato simuladas en comparación con las mostradas para la temperatura del follaje (Figuras 4 y 5). Además, las temperaturas del sustrato no presentan muchas variaciones entre lo medido y simulado de una temporada a otra (verano a invierno), como si ocurre en el caso del follaje. Una explicación posible es que las lluvias no afectan de sobremanera al sustrato, debido a que los mismos pots actúan como protectores frente al agua, por lo que el agua lluvia no logra llegar directamente hacia la tierra. Por otra parte, se aprecia una pequeña sobreestimación de los valores simulados respecto a lo medido para los meses de verano. Mientras que, para los resultados obtenidos en los meses de invierno (Figura 7), los valores tienden a ser subestimados, sobre todo en el mes de julio.

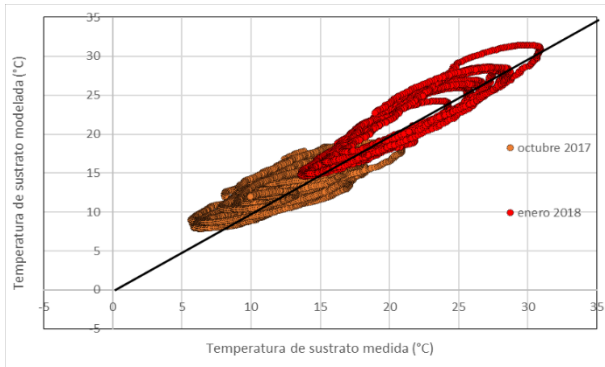


Figura 6. Correlación de resultados para temperatura del sustrato en meses cálidos. Preparado por los autores, 2018.

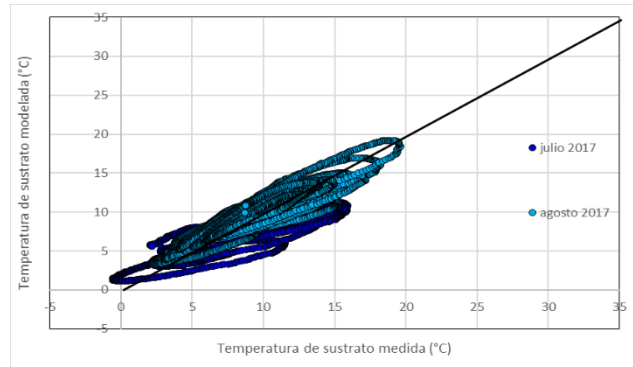


Figura 7. Correlación de resultados para temperatura del sustrato en meses fríos. Preparado por los autores, 2018.

Por otra parte, en cuanto a las simulaciones de la temperatura del sustrato versus tiempo, los mejores resultados se encuentran en el mes de enero de 2018, como se pueden apreciar en la Figura 8. El RMSD presentado para la semana del 10 al 16 de enero es 1,85°C, lo que viene dado principalmente por el pequeño desfase presentado entre los valores medidos y los modelados. Este desfase puede estar asociado nuevamente al contenido de humedad, el cual tiene influencia en la inercia, ya que de esta depende la capacidad calorífica del sustrato y también la conductividad térmica. Por otro lado, en el mes de julio hay menos acuerdo entre las temperaturas del sustrato medidas y simuladas (Figura 9), los cuales muestran un RMSD de 2,5°C. En este caso, se presenta un pequeño desfase entre la temperatura modelada y medida, lo que genera que un incremento leve del RMSD.

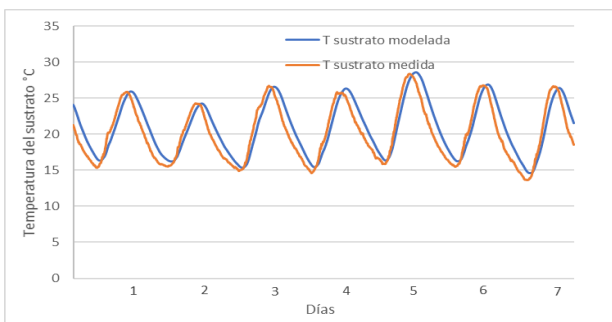


Figura 8. Resultados simulación temperatura del sustrato entre el 10 y el 16 de enero de 2018.

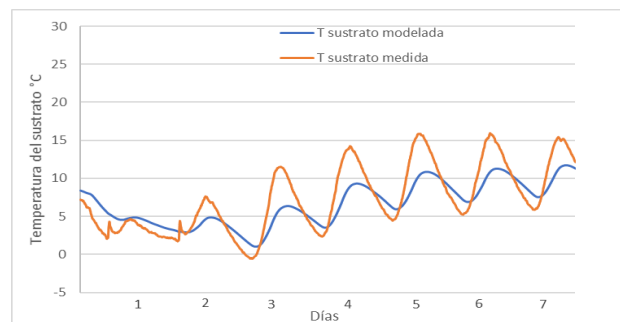


Figura 9. Resultados simulación temperatura del sustrato entre el 15 y el 21 de julio de 2017.

## Discusión y Conclusiones

Al adaptar el modelo de techos a muros, se realizan simulaciones para variados meses, considerando los datos experimentales obtenidos de laboratorio. Con ello, se tiene que los meses con mejores resultados corresponden a los meses de verano para la temperatura del follaje, por lo que se concluye que tanto la lluvia como la radiación solar incidente en día nublados pueden tener ciertas implicancias en la simulación de estos valores. Por otra parte, los resultados obtenidos para la temperatura del sustrato no presentan grandes variaciones en su dispersión respecto de las temporadas de verano e invierno.

Los mejores resultados para la simulación de temperatura de follaje se presentan en octubre, el cual posee un RMSD de 1,06°C, mientras que, para la temperatura del sustrato se presentan en enero, con un RMSD de 1,85°C. Dichos resultados, presentan buenas aproximaciones de los valores simulados por el modelo respecto a los medidos en el LIVE.

Por otra parte, los resultados de simulaciones más alejadas de los valores medidos se presentan ambos en el mes de julio, con valores de RMSD de 5,25°C para el follaje, mientras que para el caso del sustrato, se tiene un RMSD de 2,5°C. Se espera corregir el desfase existente para las temperaturas del follaje en meses de invierno, de forma de ajustar el proceso de transpiración de las plantas y verificar su incidencia en las simulaciones.

Cabe destacar que el modelo de muros vegetales adaptado de techos presenta buenos resultados, especialmente para los meses de verano en cuanto a la temperatura del follaje y durante las temporadas cálidas y frías para la del sustrato. A partir de esto, se concluye que el modelo se comporta de manera correcta al predecir cercanamente la temperatura de mayor interés, la cual corresponde a la del sustrato.

Finalmente, se contribuye con la elaboración de un modelo de transporte de calor y masa para muros vegetales implementado en el software Matlab, capaz de predecir de buena manera la temperatura del sustrato, bajo condiciones climáticas semiáridas, la cual corresponderá a la condición de borde del modelo de simulación energética para evaluar el impacto de los muros vegetales en el desempeño energético de los edificios. De esta manera, el siguiente paso de investigación corresponde al acoplamiento del modelo desarrollado a la herramienta de simulación EnergyPlus, con objeto de poder realizar el estudio de su impacto en las cargas térmicas sensibles de este.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Cristian Godoy, técnico del laboratorio LIVE, que nos ayudó a realizar todas las mediciones necesarias para este estudio. Los autores agradecen el financiamiento de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile mediante los proyectos FONDECYT 1150675 y 1181610, y el apoyo del proyecto CONICYT/FONDAP 15110020 CEDEUS.

## Referencias

- Asociación Chilena de Eficiencia Energética (2016). *Elevado gasto energético en edificios por conceptos de climatización*. Disponible en: <https://www.acee.cl/elevado-gasto-energetico-en-edificios-por-concepto-de-climatizacion/>
- Chen, T., Armaly, B., & Ramachandran, N. (1986). Correlations for laminar mixed convection flows on vertical, inclined, and horizontal flat plates. *Journal of Heat Transfer*, 108, 835-840.
- Churchill, S. W. (1977). A comprehensive correlating equation for laminar, assisting, forced and free convection. *AIChE Journal*, 23(1), 10-16.
- He, Y., Yu, H., Ozaki, A., Dong, N., & Zheng, S. (2017). An investigation on the thermal and energy performance of living wall system in Shanghai area. *Energy and Buildings*, 140, 324-335. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.083>
- Malys, L., Musy, M., & Inard, C. (2014). A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption. *Building and Environment*, 73, 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.012>
- Pinto, C. (2017). Coupling EnergyPlus and two improved and validated heat and mass transfer vegetated roof models in matlab for retail building energy simulations in semiarid climates. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Scarpa, M., Mazzali, U., & Peron, F. (2014). Modeling the energy performance of living walls: Validation against field measurements in temperate climate. *Energy and Buildings*, 79, 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.014>
- Tabares-velasco, P. C., Zhao, M., Peterson, N., Srebric, J., & Berghage, R. (2012). Validation of predictive heat and mass transfer green roof model with extensive green roof field data. *Ecological Engineering*, 47, 165-173. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.012>

# Simulación de puentes térmicos basados en soluciones constructivas de acondicionamiento térmico propuestas por el Ministerio de vivienda y urbanismo de Chile.

## Simulation of thermal bridges based on constructive thermal conditioning solutions proposed by the Ministry of Housing and Urban of Chile.

### Aner Martinez-Soto

Filiación: Universidad de La Frontera

Dirección: 4780000

Correo: [aner.martinez@ufrontera.cl](mailto:aner.martinez@ufrontera.cl)

### Michelle Vera-Fonseca

Filiación: Universidad de La Frontera

Dirección: 4780000

Correo: [m.vera06@ufromail.cl](mailto:m.vera06@ufromail.cl)

**Manuscript Code:** 088

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

### Resumen

Las soluciones constructivas de acondicionamiento térmico propuestas por el Ministerio de vivienda y urbanismo de Chile si bien contribuyen a disminuir las pérdidas por transmisión no garantizan temperaturas superficiales interiores que disminuyan los riesgos de condensación de la humedad. En este estudio se cuantifica la disminución de las pérdidas por transmisión y adicionalmente se analiza los riesgos de condensación de la humedad en los puentes térmicos geométricos (PTG) que se presentan en cada solución constructiva. Aquí se realizó una compilación de soluciones constructivas representativas del parque residencial chileno. Dichas soluciones fueron simuladas como puentes térmicos en el software THERM a fin de determinar la transmitancia térmica del envolvente, la transmitancia lineal en los PTG y los riesgos de condensación de la humedad. Los resultados muestran una reducción promedio de las pérdidas de calor por transmisión cercana al 30%, pero que no hay rompimientos de puentes térmicos por lo que se prevé que en la mayoría de las zonas térmicas de Chile existirán riesgos de condensación de la humedad y por ende la proliferación de hongos y mohos. Finalmente en este artículo se entregan recomendaciones para el rompimiento de PTG y la reducción de riesgos de condensación de humedad para las soluciones constructivas analizadas.

**Palabras claves:** Simulación; Puentes Térmicos; Soluciones constructivas.

### Abstract

The constructive solutions of thermal conditioning proposed by the Ministry of Housing and Urban of Chile, although contribute to reduce transmission losses, they do not guarantee an interior surface temperatures that reduce the risks of condensation of the humidity. In this study, the decrease in transmission losses is quantified and the moisture condensation risks in the geometric thermal bridges (PTG), which are presented in each construction solution, are analyzed. Here a representative compilation of constructive solutions of the Chilean housing stock was carried out. These solutions were simulated as thermal bridges in the THERM-software in order to determine the thermal transmission of the building envelope, the linear transmission in the PTG and the risks of humidity condensation. The results show a reduction of 30% in the heat loss transmission, but there are no thermal bridge breaks, so it is expected that in most of the thermal zones of Chile there are risks of condensation of humidity and therefore the proliferation of fungi and / or molds. Finally, in this article, recommendations for the breaking of PTG and the reduction of risks of condensation of humidity for the constructive solutions analyzed, are given.

**Keywords:** Simulation, Thermal Bridges, construction solutions

## 1. Introduccion

En Chile más del 67% del total de viviendas fue construido antes de la primera Reglamentación Térmica (RT) la cual entró en vigencia el año 2000 (INE, 2016). En eso sentido, diversos autores han señalado que la mayor parte de las viviendas existentes han sido aisladas térmicamente de forma deficiente o simplemente carecen de ella (Martínez, Sarmiento & Urquieta, 2016)–(Ramos, 2012) y no ofrecen rangos de confort aceptables para sus usuarios (Hatt, Saelzer, Hempel & Gerber, 2012). Por otro lado se observa que en las viviendas construidas después de la primera RT tampoco hay una directa correlación entre el uso de aislación térmica establecida en las normativas vigentes y el confort térmico percibido por los usuarios (Espinosa, 2015). Adicionalmente con el mayor cerramiento y hermeticidad de las viviendas el fenómeno de condensación de humedad se ha transformado en un problema recurrente (Martínez, Sarmiento & Urquieta, 2016). En este trabajo se muestra cuales son los puntos donde existe mayor riesgo de

condensación de humedad en viviendas que utilizan soluciones constructivas de acondicionamiento térmico propuestas por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile.

## 2. Estado del arte del problema

En la primera etapa de la Reglamentación Térmica, se establecieron valores máximos de transmitancia térmica para la techumbre de las viviendas de cada una de las 7 zonas térmicas definidas para Chile. Así por ejemplo, se definió que la transmitancia térmica para los complejos de techumbre de las viviendas emplazadas en la zona térmica 1 (norte de Chile) no debía superar los 0,84 ( $W/m^2K$ ) mientras que para una vivienda emplazada en la zona 7 (sur de Chile) dicho valor no debía exceder los 0,25 ( $W/m^2K$ ) (MINVU, 2006). En la segunda etapa de la Reglamentación Térmica (año 2007) se establecieron valores máximos de transmitancia térmica para muros exteriores, pisos ventilados y ventanas con el fin de promover el uso de aislación térmica en la mayor parte de la envolvente.

Actualmente, se mantienen vigentes los valores que se establecieron en la segunda etapa de la Reglamentación Térmica, pero existen comunas que se declararon Zona Saturada por Material Particulado Fino Respirable MP2,5, por lo que se elaboraron medidas efectivas materializadas en Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA). Estos planes consideran dos medidas estructurales: 1) el acondicionamiento térmico de viviendas, el cual tiene por objetivo disminuir el requerimiento energético de la población, y 2) la sustitución de sistemas de calefacción contaminantes por sistemas eficientes y con menos emisiones a la atmósfera pero también las intradomiciliarias [7]. Aquí se debe destacar que adicionalmente se consideró el acceso a un subsidio para aislar térmicamente las viviendas existentes y el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) de Chile ha propuesto una serie de soluciones constructivas representativas para lograr los mismos objetivos.

Sin embargo éstas medidas desde el punto de vista físico contribuyen a disminuir sólo las pérdidas de energía térmica por conducción pero no garantizan necesariamente confort térmico y cuando no se consideran aspectos relacionados con la humedad existen riesgos de condensación superficial del vapor de agua, generando una disminución de la calidad de aislación del envolvente de las viviendas y además existe el riesgo de proliferación de hongos o mohos.

Análisis higrotérmicos de las soluciones constructivas propuestas Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile no han sido realizadas. En este trabajo se realizó una compilación de soluciones constructivas representativas del parque residencial chileno basadas en el MINVU. Dichas soluciones fueron simuladas como puentes térmicos en el software THERM a fin de determinar la transmitancia térmica del envolvente, la transmitancia lineal en los PTG y los riesgos de condensación de la humedad. Los resultados de este trabajo contribuye a la detección de las zonas dónde mayores riesgos de condensaciones intersticiales de humedad existen. Aquí se muestran adicionalmente valores de transmitancia térmica del envolvente y la transmitancia lineal en los puentes térmicos geométricos a fin de generar una base de datos para determinar pérdidas por conducción en los edificios que utilicen las soluciones constructivas del MINVU. Finalmente en este artículo se entregan recomendaciones para el rompimiento de PTG y la reducción de riesgos de condensación de humedad para las soluciones constructivas analizadas.

## 3. Metodología

La metodología empleada para el análisis higrotérmico de las soluciones constructivas propuestas por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo se realizó en base al software ThermCAD. ThermCAD se basa en Modelación de Elementos Finitos con una superficie de trabajo en CAD y permite la determinación de isoterms o temperaturas en ciertos puntos de la solución constructiva que se esté analizando. Este software es utilizado usualmente para el cálculo de las transmitancias lineales de los puentes térmicos y zonas de riesgos de condensación de la humedad.

Para realizar las simulaciones y análisis de las soluciones constructivas como puentes térmicos geométricos se realizaron los siguientes pasos: 1) Representación de puentes térmicos en ThermCad basados en las soluciones propuestas por el MINVU, 2) Determinación de las condiciones de contorno para las diversas representaciones, 3) Simulación de los puentes térmicos y determinación de transmitancias lineales de los puentes térmicos y zonas de riesgos de condensación de la humedad.

### 3.1 Representación de puentes térmicos en ThermCad basados en las soluciones propuestas por el MINVU.

Para realizar la representación de puentes térmicos en ThermCad se eligieron soluciones constructivas representativas basadas en los materiales mas usados en las construcciones en Chile, es decir; albañilerías con ladrillos, tabiquerías de

madera y muros de hormigón armado. En primera instancia se consideraron soluciones constructivas sin aislación térmica a fin de determinar posteriormente el impacto en la reducción de pérdidas por conducción en viviendas que se han realizado acondicionamientos térmicos. En segunda instancia, se simularon las soluciones constructivas con el acondicionamiento térmico propuesto por el Ministerio de Viviendas y Urbanismo. Dichas soluciones son aplicadas a viviendas que presentan la misma materialidad que las mencionadas anteriormente (albañilería, tabiquería de madera y hormigón armado), pero a diferencia de la primera simulación estas presentan diferentes sistemas de aislación térmica que ayudan a disminuir la transmitancia térmica en las viviendas.

### 3.2 Condiciones de contorno para las diversas representaciones.

Una vez realizada la representación de los distintos puentes térmicos a simular, complementadas con sus respectivas materialidades, se deben considerar las condiciones de contorno a las que se encuentran expuestas las viviendas. Aquí se debe señalar que es de suma importancia identificar los sectores que se encuentran calefaccionados en la vivienda, los sectores que no presentarán calefacción, los que se encontrarán bajo tierra y los que serán expuestos al aire libre, porque determinan la dirección y cuantía del flujo de calor. Dichas condiciones de contorno nos permiten tener en cuenta el flujo de la energía térmica que se considerara para la simulación final.

### 3.3 Simulación de los puentes térmicos y determinación de transmitancias lineales de los puentes térmicos y zonas de riesgos de condensación de la humedad.

Posterior a la definición de las condiciones de contorno se simularon los puentes térmicos y se determinaron las transmitancias térmicas lineales (Psi-Wert) y las zonas de riesgos de condensación de la humedad (F-Wert). Basado en la normativa alemana se definió que un F-wert inferior a 0.7 significaría que existen riesgos de condensación de humedad y proliferación de hongos y mohos. Aquí se debe mencionar que se realizaron distintas simulaciones de acuerdo con las temperaturas exteriores relacionadas a la zonificación térmica de Chile. Estas simulaciones se realizaron a fin de representar las posibles variaciones en los resultados en función de la zona térmica donde se evalúan dichos puentes térmicos. Por otro lado, para la temperatura interior se consideraron 20°C independiente para todas las zonas térmica.

Tabla 1: Clasificación de zonas térmicas de Chile. Elaboración propia basada en [8]

| Zonas térmicas Chile | Grados-Día [Kd] | Temperaturas mínimas promedio [°C] |
|----------------------|-----------------|------------------------------------|
| Zona térmica 1       | ≤ 500           | 12.1                               |
| Zona térmica 2       | > 500 - ≤ 750   | 8.3                                |
| Zona térmica 3       | > 750 - ≤ 1000  | 7.4                                |
| Zona térmica 4       | > 1000 - ≤ 1250 | 7.2                                |
| Zona térmica 5       | > 1250 - ≤ 1500 | 5.9                                |
| Zona térmica 6       | > 1500 - ≤ 2000 | 6.4                                |
| Zona térmica 7       | > 2000          | 1.0                                |

## 4. Resultados

Los resultados obtenidos mediante la simulación de puentes térmicos geométricos entre muro-piso y muro-cielo en viviendas residenciales chilenas se muestran en las *figuras del 1 al 6*. Estos resultados se presentarán de acuerdo con el tipo de materialidad que se componen los PTG. (albañilería, hormigón o madera).

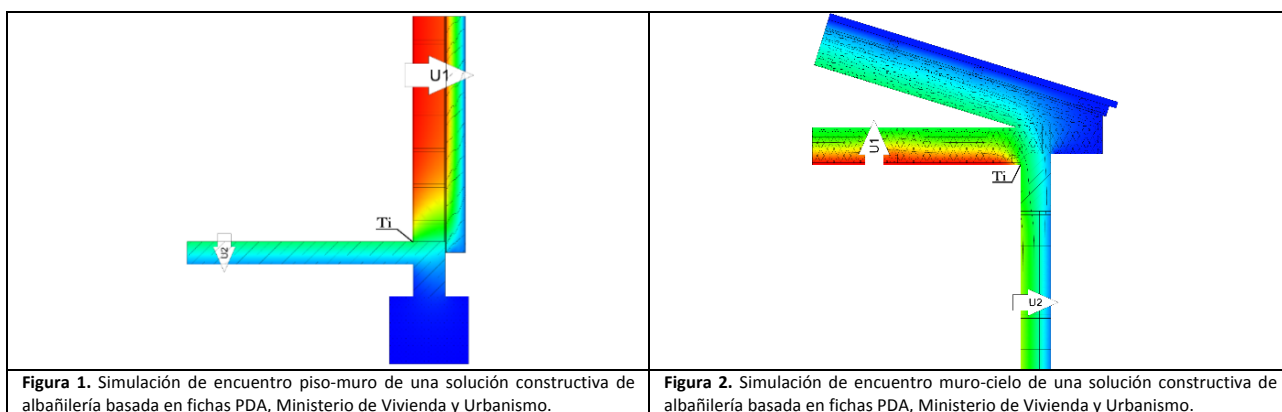
### 4.1 Resultados de puentes térmicos geométricos en soluciones constructivas de albañilería

La *figura 1* muestra los resultados de la solución constructiva de acondicionamiento térmico propuesta por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, en el cual se puede visualizar el puente térmico geométrico entre un muro de albañilería y radier. El muro de albañilería cuenta con aislación térmica exterior en base a sistema E.I.F.S, en donde los resultados obtenidos en transmitancia térmica para el muro (U1) alcanza los 0.3727 [W/m<sup>2</sup>K] y para el piso (U2) alcanza los 3.6697 [W/m<sup>2</sup>K]. Aquí se determinó que estos valores son un 15% menor que en las mismas soluciones constructivas sin aislamiento térmico. Los resultados obtenidos para el Psi-Wert y el F-Wert son 0.402 y 0.285 respectivamente. Lo que indica que no ha rompimiento del puente térmico y que en esa zona las perdidas por conducción aumentarán casi al doble. Por otro lado como el F-Wert es inferior a 0.7 se deduce que en este tipo de solución constructiva existe el riesgo de condensación de humedad. Adicionalmente se identificó que en el vértice



donde se conluyen el muro y el piso se obtiene la menor temperatura superficial interior (4.93°C) por lo que se espera que en ese punto hay mayores riesgos de condensaciones intersticiales.

La *figura 2* muestra los resultados de la solución constructiva de acondicionamiento térmico propuesta por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, en el cual se puede visualizar el puente térmico geométrico entre un muro de albañilería y una techumbre de madera. El cielo presenta aislación térmica en base a lana mineral, encontrándose entre el cielo y la techumbre un entretecho no calefaccionado. En este caso se consideró la transmitancia térmica del cielo (U1), el cual alcanza los 0.2203 [W/m<sup>2</sup>K]. Con relación al muro este presenta similares características a las ya mencionadas para el PT mostrado en la *figura 1*. Los resultados de la simulación muestran que la transmitancia térmica en el cielo es un 50% menor que en las mismas soluciones constructivas sin aislamiento térmico. Adicionalmente se obtuvo que el Psi-Wert y el F-Wert son 0.311 y 0.340 respectivamente. Lo que indica que al igual que en el PT de la *figura 1*, no hay rompimiento del puente térmico y que en esa zona las perdidas por conducción aumentarán en un 30% con respecto a la transmitancia del muro. Por otro lado como el F-Wert es inferior a 0.7 se deduce que en este tipo de solución constructiva existe el riesgo de condensación de humedad. Adicionalmente se identificó que en el vértice donde se conluyen el muro y el cielo se obtiene la menor temperatura superficial interior (7.15°C) por lo que se espera que en ese punto hay mayores riesgos de condensaciones intersticiales.



#### 4.2 Resultados de puentes térmicos geométricos en soluciones constructivas de hormigón armado.

La *figura 3* presenta los resultados de la solución constructiva de acondicionamiento térmico propuesta por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, en el cual se puede visualizar el puente térmico geométrico entre un muro de hormigón armado y radier. El muro de hormigón armado cuenta con aislación térmica exterior utilizando poliestireno expandido entre tabiquerías de madera como soporte, en donde los resultados obtenidos en transmitancia térmica para el muro (U1) alcanza los 0.3874 [W/m<sup>2</sup>K] y para el piso (U2) alcanza los 3.6697 [W/m<sup>2</sup>K]. Aquí se determinó que estos valores son un 11% menor que en soluciones constructivas similares, pero sin aislamiento térmico. Los resultados obtenidos para el Psi-Wert y el F-Wert son 0.559 y 0.291 respectivamente. Lo que indica que no se produce un rompimiento del puente térmico y que en esa zona las perdidas por conducción aumentarán en esa zona. Por otro lado, como el F-Wert es inferior a 0.7, por ende, se deduce que en este tipo de soluciones constructivas existe el riesgo de condensación de humedad. Adicionalmente se identificó que en el vértice donde se conluyen el muro y el piso se obtiene la menor temperatura superficial interior (5.75°C) por lo que se espera que en ese punto hay mayores riesgos de condensaciones intersticiales.

La *figura 4* presenta los resultados de la solución constructiva de acondicionamiento térmico propuesta por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, en el cual se puede visualizar el puente térmico geométrico entre un muro de hormigón armado y una techumbre de madera. El cielo presenta aislación térmica en base a lana mineral, encontrándose entre el cielo y la techumbre un entretecho no calefaccionado. En este caso se consideró la transmitancia térmica del cielo (U1), el cual alcanza los 0.2203 [W/m<sup>2</sup>K]. Con relación al muro este presenta similares características a las ya mencionadas para el PT mostrado en la *figura 3*. Los resultados de la simulación muestran que la transmitancia térmica en el cielo es un 50% menor que en las mismas soluciones constructivas sin aislamiento térmico. Adicionalmente se obtuvo que el Psi-Wert y el F-Wert son -0.011 y 0.334 respectivamente. Lo que indica que a diferencia del PT presentado en la *figura 3*, ocurre un rompimiento del puente térmico y que en esa zona las pérdidas por conducción serán menores en relación a las transmitancias térmicas del muro y cielo. Por otro lado, como el F-Wert es inferior a 0.7 se deduce que en este tipo de solución constructiva existe el riesgo de condensación de humedad. Adicionalmente se identificó que en el vértice donde se conluyen el muro y el cielo se obtiene la menor

temperatura superficial interior (7.13°C) por lo que se espera que en ese punto hay mayores riesgos de condensaciones intersticiales.

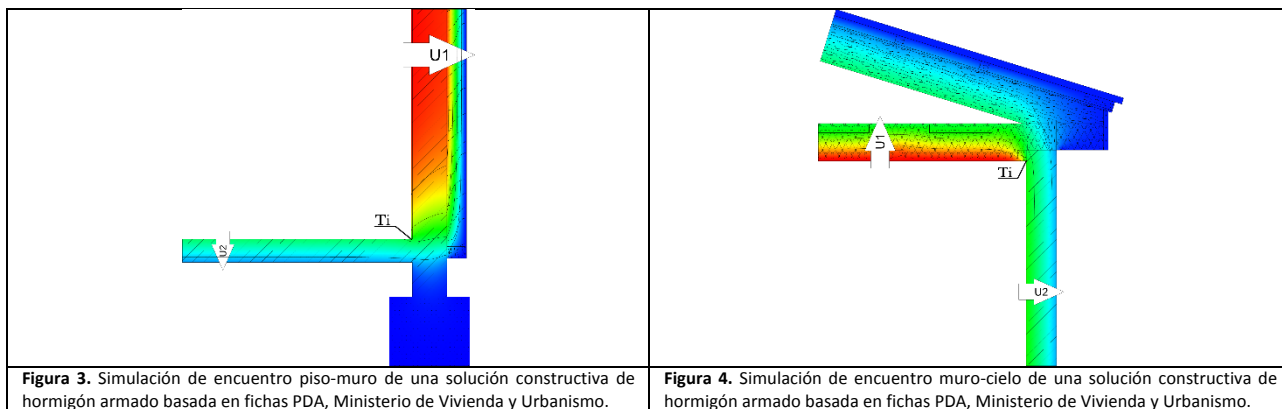


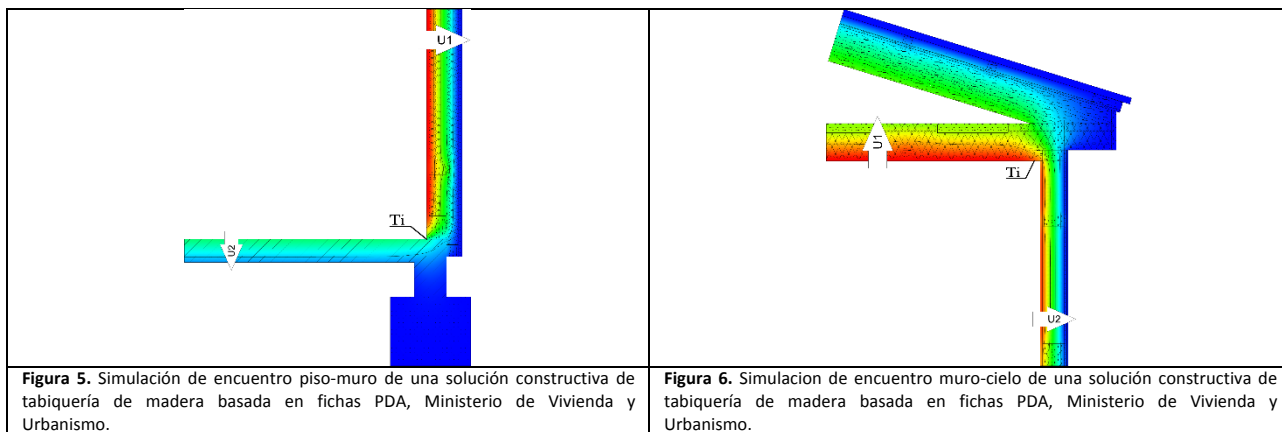
Figura 3. Simulación de encuentro piso-muro de una solución constructiva de hormigón armado basada en fichas PDA, Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

Figura 4. Simulación de encuentro muro-cielo de una solución constructiva de hormigón armado basada en fichas PDA, Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

### 4.3 Resultados de puentes térmicos geométricos en soluciones constructivas de tabiquería de madera.

La *figura 5* muestra los resultados de la solución constructiva de acondicionamiento térmico propuesta por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, en el cual se puede visualizar el puente térmico geométrico generado entre un muro de tabiquería de madera y radier. El muro de tabiquería cuenta con aislación térmica interior y exterior utilizando lana mineral, en donde los resultados obtenidos en transmitancia térmica para el muro (U1) alcanza los 0.2822 [W/m<sup>2</sup>K] y para el piso (U2) alcanza los 3.6697 [W/m<sup>2</sup>K]. Aquí se determinó que estos valores son un 79% menor que en las mismas soluciones constructivas pero que no presentan aislación térmica. Los resultados obtenidos para el Psi-Wert y el F-Wert son 0.386 y 0.262 respectivamente. Lo que indica que no se produce un rompimiento del puente térmico y que en esa zona las pérdidas por conducción aumentarán. Por otro lado, como el F-Wert es inferior a 0.7 se deduce que en este tipo de solución constructiva existe el riesgo de condensación de humedad. Adicionalmente se identificó que en el vértice donde se conluyen el muro y el piso se obtiene la menor temperatura superficial interior (3.57°C) por lo que se espera que en ese punto hay mayores riesgos de condensaciones intersticiales.

La *figura 6* muestra los resultados de la solución constructiva de acondicionamiento térmico propuesta por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, en el cual se puede visualizar el puente térmico geométrico entre un muro de tabiquería de madera y una techumbre de madera. El cielo presenta aislación térmica en base a lana mineral, encontrándose entre el cielo y la techumbre un entretecho no calefaccionado. En este caso se consideró la transmitancia térmica del cielo (U1), el cual alcanza los 0.2203 [W/m<sup>2</sup>K]. Con relación al muro este presenta similares características a las ya mencionadas para el PT mostrado en la *figura 5*. Los resultados de la simulación muestran que la transmitancia térmica en el cielo es un 50% menor que en las mismas soluciones constructivas sin asilamiento térmico. Adicionalmente se obtuvo que el Psi-Wert y el F-Wert son 0.125 y 0.823 respectivamente. Lo que indica que al igual que en la *figura 5* no hay rompimiento del puente térmico. Por otro lado, como el F-Wert es superior a 0.7 se deduce que a diferencia de la *figura 5*, en este tipo de solución constructiva no existe el riesgo de condensación de humedad. Adicionalmente se identificó que en el vértice donde se conluyen el muro y el cielo se obtiene la menor temperatura superficial interior (17.20°C) por lo que se espera que en ese punto los riesgos de condensaciones intersticiales son mínimas.



## Discusión y Conclusiones

En este trabajo se analizan desde el punto de vista higrotérmico las soluciones constructivas de acondicionamiento térmico propuestas por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile. Para ello se cuantificó las pérdidas por transmisión en los muros y en los puentes térmicos geométricos (PTG), adicionalmente se analiza los riesgos de condensación de la humedad en los puntos mas desfavorables de las soluciones constructivas.

Se determinó que si bien las soluciones propuestas contribuyen a disminuir las pérdidas por transmisión, éstas no garantizan temperaturas superficiales interiores que disminuyan los riesgos de condensación de la humedad y no siempre se rompen los puentes térmicos. Se observa que el uso de aislantes térmicos tiene mayor impacto en las soluciones constructivas de madera que en las de albañilería u hormigón. Adicionalmente los resultados muestran que en casi todas las soluciones constructivas propuestas no se rompen los puentes térmicos y se prevé que en la mayoría de las zonas térmicas de Chile existirán riesgos de condensación de la humedad y por ende la proliferación de hongos y mohos.

## Referencias

- INE, "Censos de Población y Vivienda in, Instituto Nacional de Estadísticas, Santiago de Chile." Instituto Nacional de Estadísticas, Santiago de Chile, 2016.
- P. Martínez, P. Sarmiento, and W. Urquieta, "Evaluación de la humedad por condensación dentro de viviendas sociales," vol. 20, no. 55, pp. 154–165, 2009.
- T. Hatt, G. Saelzer, R. Hempel, and A. Gerber, "Alto confort interior con minimo consumo energetico a partir de la implementacion del estandar 'Passivhaus' en Chile," Rev. la Constr., vol. 11, no. 2, pp. 123–134, 2012.
- N. P. R. Ramos, "Consumo de energía a nivel residencial en Chile y análisis de eficiencia energética en calefacción," Universidad de Chile, 2011.
- C. A. Espinosa C., "Confort higro-térmico en vivienda social y la percepción del habitante," Rev. invi N°85/noviembre, 2015.
- MINVU, "Manual de aplicacion reglamentacion termica," Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Santiago, Chile, 2006.
- MMA, "Plan de Descontaminación Atmosférica MP 2,5. Decreto Supremo número 8." Ministerio del Mediambiente, Santiago, Chile, 2015.
- DMCh, "Anuario climatologico," Santiago, Dirección Meteorologica de Chile, 2010.

# Modelo EES para el análisis de viabilidad de uso de TABS en edificios de oficinas en Chile

EES model for the feasibility analysis of Thermoactive Building Systems in office buildings in Chile

## Miguel Ángel Gálvez

Filiación: Departamento de Arquitectura, Universidad Técnica Federico Santa María  
Dirección: Av. España, 1680, Valparaíso, Chile.  
Correo:miguel.galvez@usm.cl

## Rodrigo Barraza

Filiación: Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María  
Dirección: Avda. Vicuña Mackenna 3939, San Joaquín, Santiago, Chile.  
Correo:rodrigo.barraza@usm.cl

## Nina Hormazábal

Filiación: Departamento de Arquitectura, Universidad Técnica Federico Santa María  
Dirección: Av. España, 1680, Valparaíso, Chile.  
Correo:nina.hormazabal@usm.cl

## Álvaro Curinao

Filiación: Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María  
Dirección: Avda. Vicuña Mackenna 3939, San Joaquín, Santiago, Chile.  
Correo:alvaro.curinao@alumnos.usm.cl

**Manuscript Code:** 090

**Date of Acceptance/Reception:** 27-09-2018/24-08-2018

### Resumen

TABS (Thermally Activated Building System) es un sistema de climatización por agua que usa la masa térmica de losas y muros de hormigón para regular la temperatura de los ambientes. El empleo de estos sistemas en usos no residenciales, especialmente en oficinas, se ha intensificado durante los últimos años en todo el mundo, así como la investigación asociada a los mismos. Sin embargo, no se tiene constancia de trabajos académicos al respecto en el ámbito nacional chileno. El trabajo presentado consiste en la elaboración de un modelo teórico para estudiar la viabilidad de la implantación del sistema en Chile, de forma que permita, desde una concepción integral del sistema, sentar las bases teóricas su diseño atendiendo a las circunstancias propias del contexto local chileno, principalmente las muy diferentes realidades climáticas y su elevado riesgo sísmico. Para ello se ha trabajado con un modelo analítico, construido en el entorno computacional EES. Se ha utilizado este software por su carácter modular y su concepción paramétrica, de forma que pueda ir incorporando de manera flexible y secuencial las muchas variables que intervienen en el problema. En la primera etapa, que aquí se presenta, se ha desarrollado el modelo base para un edificio de oficinas tipo, al que se le ha hecho correr para distintas zonas climáticas chilenas, que van desde el desierto de Atacama a la Patagonia. El modelo incluye por defecto una definición estándar de las características constructivas de la envolvente, así como del modelo de confort térmico, el sistema de ventilación mecánica, la producción térmica y el sistema de control utilizados. Esta simulación ha permitido extraer unas primeras consecuencias acerca de su comportamiento en diferentes climas que sirva de base para incorporar progresivamente diferentes alternativas en cuanto a la producción térmica, el diseño del ambiente higrotérmico interior, la eficiencia de la ventilación y, especialmente, el control del sistema (modelos predictivos), de manera que se pueda determinar la influencia de cada uno de estos aspectos en el consumo energético global y optimizar el conjunto de alternativas más adecuadas para cada zona climática.

**Palabras claves:** TABS; EES; Edificios oficinas en Chile.

### Abstract

TABS stands for Thermally Activated Building System. The application of these systems in non-residential uses, especially in offices, has intensified in recent years throughout the world, as well as the research works carried out on this subject. However, there is no record of equivalent studies in the Chilean scientific community. The paper describes a theoretical model used to study the feasibility of the introduction of such system in Chile, in order to set the basis for its design taking into account the specific circumstances of the local context, mainly its different climatic realities and the high seismic risk all along the country. To this end, an analytical model has been built using Engineering Equation Solver (EES) software. It has been chosen due to its flexibility and parametric architecture, so that it can successively introduce the many variables that have influence on the phenomenon. In the first stage, which is presented here, it has been developed a base model for a typical office building, which has been run on four design days for different Chilean climatic zones, ranging from the Atacama Desert to the Patagonia. By default, the model uses a standard definition of the construction characteristics of the envelope, as well as conventional assumptions on the thermal comfort model, the mechanical ventilation system, the thermal production and the control system used. The simulation draws interesting results about its performance in different climates that will serve as a basis to progressively incorporate different alternatives in terms of thermal production (with renewable energies), indoor hygrothermal conditions (with adaptive comfort models), efficiency of ventilation (using dedicated outdoor air systems with heat recovery)

and especially the control of the system (by means of predictive models). It is intended to evaluate the influence of each of these aspects on the total energy consumption, in order to optimize the most suitable set of alternatives for each climate zone

**Keywords:** TABS; EES; Office buildings in Chile.

## Introducción

Por TABS se entiende Thermally Activated Building System. Es un sistema de climatización por agua que usa la masa térmica de losas y muros de hormigón para regular la temperatura de los ambientes. Para ello, estos elementos constructivos se “activan” térmicamente mediante un serpentín de agua en su interior, funcionando con pequeñas diferencias de temperatura del agua respecto del ambiente. Supone una forma radicalmente distinta de afrontar la climatización, pues el propio edificio sustituye al aire como elemento al que confiar el acondicionamiento térmico de los ambientes (Moe, 2010).

Algunas ventajas del sistema son:

- Las temperaturas del agua que emplean suponen una reducción general del consumo de energía del sistema y hacen posible emplear fuentes térmicas de baja temperatura (Olesen, 2000).
- Combinado con un sistema de ventilación 100% aire exterior, conduce a altas calidades del aire (Henze et al., 2008), además de que estos sistemas pueden combatir las cargas térmicas latentes y ayudar en los momentos de carga punta.
- Desaparecen las unidades terminales a la vista (fancoils, radiadores, convectores, techos y vigas frías). Además, al reducir el caudal de aire a mover al estrictamente necesario para ventilación se puede fácilmente prescindir de falsos cielos.

También tiene sus desventajas, entre las que se destacan la lentitud de respuesta y la dificultad del control, e inconvenientes como la interferencia con la estructura.

El empleo de estos sistemas en usos no residenciales, especialmente en oficinas, se ha intensificado durante los últimos años, así como la investigación asociada a los mismos. Lejos quedan ya los primeros intentos de sistematización de la activación de la masa térmica de los edificios tanto con agua (Feustel y Stetiu, 1995) como por aire (Koschenz y Doren, 1998).

Están inicialmente concebidos para climas fríos. Se ha demostrado también un buen funcionamiento para climas continentales, caracterizados por oscilaciones térmicas diarias acusadas. La propia capacidad de almacenamiento los hace adecuados en situaciones de altas ganancias térmicas, sean externas por radiación o internas por ocupantes, equipos e iluminación.

Las principales estrategias para reducir el consumo energético del sistema están en relacionadas con el empleo de adecuados sistemas de control (Lehmann et al., 2011), el aprovechamiento de fuentes de energía renovables, especialmente geotérmica (Fellin y Sommer, 2003), o el uso de sistemas pasivos.

Por último, la influencia en el confort térmico de los cambios de la temperatura operativa debido a la lentitud de respuesta del sistema ha sido estudiada siempre desde una perspectiva racional (Kolarik, 2011), quedando todavía por profundizar en el estudio de esta influencia con modelos adaptativos (De Dear, 2013).

El hecho de que Chile sea un país con elevado riesgo sísmico, y que se utilice de manera extensiva el hormigón armado como solución frente a este problema, hace que las edificaciones chilenas presenten un potencial de uso de los TABS. Sin embargo, ante la inexistencia de estudios al respecto en el ámbito académico local, se impone analizar posibilidades que brinda el sistema para adaptarlo a la realidad del país, caracterizada por su extrema variedad de climas. Como todo sistema de climatización, debe ser estudiado de manera integral. Así, las condiciones climáticas del entorno, la envolvente arquitectónica, el uso del edificio, las soluciones constructivas, la eficiencia energética del sistema, la concepción de la ventilación, el control automatizado, la definición de las condiciones de confort de los ocupantes y el costo del sistema constituyen un extenso cuerpo de variables, casi todas ellas dependientes, que deben estudiarse de forma conjunta. En este sentido, la figura 1 pretende ser una guía tentativa para llevar este análisis integral del sistema.

En este contexto se sitúa la investigación presentada a este congreso, para la que se ha elaborado un modelo paramétrico que describe el comportamiento dinámico de una planta intermedia de un edificio de oficinas que ha sido equipada con losas de suelo y techo activadas térmicamente, para evaluar su comportamiento en ocho localidades

chilenas representativas de la variedad climática del país. El análisis se ha realizado exclusivamente en términos de demanda térmica y evolución de temperatura del aire durante días tipo correspondientes al verano, invierno y estación intermedia. Queda para más adelante el estudio de las implicaciones energéticas del uso de distintas fuentes de producción térmica, incluidas las energías renovables.

De la misma manera, tal y como se describe a continuación, en esta fase inicial del análisis se ha utilizado una caracterización estándar de la envolvente, el régimen de uso, las tasas de ventilación, el modelo de confort y el sistema de control, fiando a la versatilidad del modelo computacional la futura evaluación de otras alternativas.

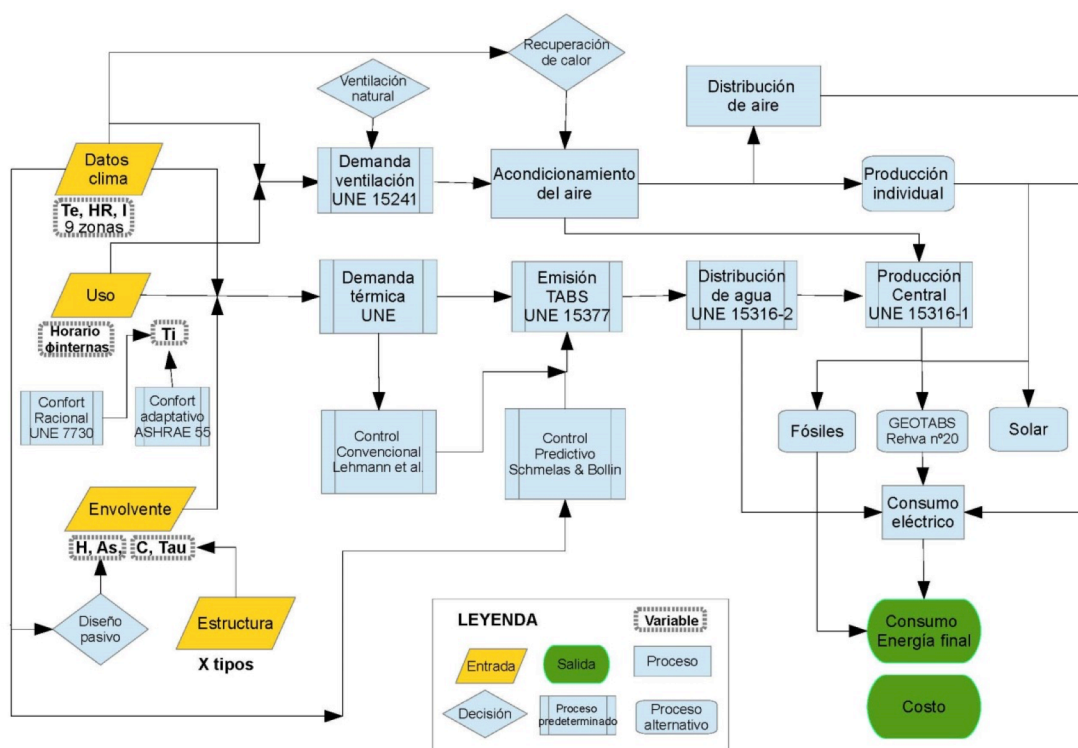


Fig. 1. Marco metodológico general

## Metodología

Objeto de estudio: el edificio

El análisis se ha realizado para una de las plantas intermedias de un edificio de oficinas cuya planta tipo y sección se muestran en la figura 2.

Como se ha dicho, un sistema TABS presupone la existencia de un paramento de elevada masa térmica en el que se dispone un serpentín por el que circula agua con una diferencia de temperatura respecto del ambiente, que se utiliza para almacenar energía térmica en el elemento constructivo y regular los intercambios convectivo-radiantes con el ambiente. En el caso analizado el elemento activado térmicamente es una losa de hormigón con la siguiente caracterización geométrica (figura 3).

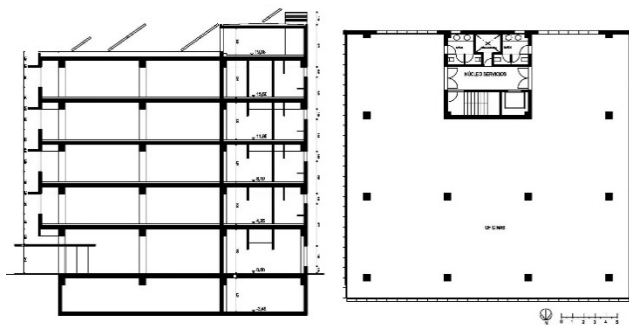


Figura 2. Edificio de oficinas analizado.  
Planta tipo y sección.

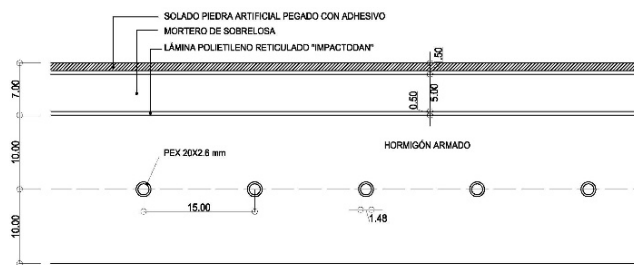


Figura 3. Detalle de losa activada térmicamente.  
Cotas en cm

La envolvente tiene una composición que cumple el anteproyecto de actualización de la normativa térmica chilena (MINVU, 2014) y que se describe en las siguientes tablas.

Tabla 1a. Composición de cerramientos opacos. Muros.

| Material               | e (m) | $\lambda$ (W/mK) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | c (J/kgK) |
|------------------------|-------|------------------|-----------------------------|-----------|
| Panel Trespá           | 0,01  | 0,17             | 600                         | 1600      |
| Poliuretano proyectado | *     | 0,028            |                             |           |
| Hormigón armado        | 0,2   | 2,5              | 2500                        | 1000      |
| Cartón yeso            | 0,015 | 0,25             | 825                         | 1000      |

\* Espesor de aislamiento mínimo para cumplir la normativa de la zona considerada

Tabla 1b. Composición de cerramientos opacos. Forjado.

| Material                 | e (m) | $\lambda$ (W/mK) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | c (J/kgK) |
|--------------------------|-------|------------------|-----------------------------|-----------|
| Solado piedra artificial | 0,015 | 0,13             | 1500                        | 1600      |
| Mortero                  | 0,05  | 1,35             | 1800                        | 1000      |
| Hormigón armado          | 0,2   | 2,5              | 2500                        | 1000      |

Tabla 1c. Composición de cerramientos acristalados.

|            | Superficie (m <sup>2</sup> ) | Vidrio exterior | Cámara (mm) | Vidrio interior | U (W/m <sup>2</sup> K) | SHGC (-) |
|------------|------------------------------|-----------------|-------------|-----------------|------------------------|----------|
| Norte      | 45,36                        | 6 CLR           | 12          | 6 CLR           | 3,31                   | 0,67     |
| Sur        | 13,77                        | 6 CLR           | 12          | 6 BE            | 2,62                   | 0,59     |
| Este/Oeste | 35,10                        | 6 BE            | 12          | 6 CLR           | 2,62                   | 0,55     |

CLR (vidrio claro)

BE (vidrio bajo emisivo  $\epsilon = 0,1$ )

SHGF (solar heat gain coefficient)

En todos los casos carpintería practicable de aluminio con rotura de puente térmico

Para reducir las ganancias solares se han utilizado dispositivos de sombra, caracterizados por su coeficiente de atenuación de sombras, que representa la fracción del flujo de calor que finalmente ingresa al recinto. Este coeficiente se determina a partir de sus valores  $IAC_0$ ,  $IAC_{60}$  y  $IAC_{difusa}$ , cuyos valores están tabulados, y la posición del sol en cada momento del año (ASHRAE, 2013).

Tabla 2. Coeficiente de atenuación de sombras

|                |      |
|----------------|------|
| $IAC_0$        | 0,25 |
| $IAC_{60}$     | 0,06 |
| $IAC_{difusa}$ | 0,37 |

Se ha considerado un edificio de oficinas con un horario de funcionamiento de lunes a viernes, continuo desde las 8 AM a las 6 PM. Durante este periodo de tiempo la temperatura ambiente debe mantenerse en el intervalo recomendado por el modelo de confort de Fanger (AENOR, 2006) para un 10% de insatisfechos (categoría de proyecto B).

**Tabla 3.** Intervalo de confort según época del año para PPI < 10%.

| Tipo de ropa       | Estación   | Intervalo de temperaturas |
|--------------------|------------|---------------------------|
| Chaqueta           | Invierno   | 20,0 ... 24,0             |
| Camisa manga larga | Transición | 21,5 ... 25,5             |
| Camisa manga corta | Verano     | 23,5 ... 27,0             |

También se han impuesto límites a los coeficientes de transmisión y a las temperaturas superficiales de suelo y techo para evitar discomfort local y eventuales condensaciones.

**Tabla 4.** Límites impuestos a las superficies de suelo y techo según tipo de acondicionamiento

|              | Coeficiente de transferencia |                         | Temperatura superficial |         |
|--------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------|
|              | Calefacción                  | Refrigeración           | Máximo                  | Mínimo  |
| <b>Suelo</b> | 11 (W/m <sup>2</sup> K)      | 7 (W/m <sup>2</sup> K)  | 29 (°C)                 |         |
| <b>Techo</b> | 6 (W/m <sup>2</sup> K)       | 11 (W/m <sup>2</sup> K) |                         | 17 (°C) |

El resto de condiciones de uso del edificio se muestran en la siguiente tabla (ASHRAE, 2013):

**Tabla 5.** Condiciones de uso del edificio.

|                                       |                       |
|---------------------------------------|-----------------------|
| <b>Superficie útil oficinas</b>       | 360 m <sup>2</sup>    |
| <b>Tasa de ocupación</b>              | 6 m <sup>2</sup> /p   |
| <b>Número de ocupantes por planta</b> | 60 p                  |
| <b>Ganancias por ocupantes</b>        | 130 W/p               |
| <b>Ganancias por iluminación</b>      | 8,1 W/m <sup>2</sup>  |
| <b>Ganancias por equipos</b>          | 8,61 W/m <sup>2</sup> |
| <b>Tasa de infiltración</b>           | 0,2 ACH               |
| <b>Tasa de ventilación</b>            | 12,5 l/s·p            |

Dada la alta carga interna de los edificios de oficinas, los sistemas TABS son habitualmente requeridos para enfriamiento del recinto a lo largo del año, por lo que su forma genérica en estos usos está asociada a sistemas de enfriamiento a través de techos. En el trabajo presentado este elemento constructivo se dispone en el forjado de una planta intermedia del edificio de oficinas descrito en el siguiente apartado. Esta disposición supone que el forjado intercambia calor por ambas caras con los ambientes con los que se encuentra en contacto.

A este elemento se le ha impuesto un caudal constante de 16 kg/hm<sup>2</sup> (400 kg/h, si se considera que cada circuito abastece a 25 m<sup>2</sup> de superficie). Por su parte, la temperatura de impulsión se hace depender de la temperatura exterior, tal como se indica más adelante en la sección de control del sistema

Para poder evaluar el comportamiento de estos sistemas en realidades climáticas tan diversas como la chilena, se han seleccionado ocho localidades representativas de los climas considerados en el citado anteproyecto de norma térmica chilena. Las localidades seleccionadas se indican en la siguiente tabla.



**Tabla 6.** Ciudades estudiadas en el trabajo

| Zona | Clima                      | Ciudad       | Estación meteorológica |
|------|----------------------------|--------------|------------------------|
| A    | Norte litoral              | Huasco       | Huasco Sívica          |
| B    | Norte desértico            | Calama       | Chiu Chiu              |
| C    | Norte valles transversales | Salamanca    | Curcumen               |
| D    | Central litoral            | Valparaíso   | Viña del Mar           |
| E    | Central interior           | Santiago     | Parque O'Higgins       |
| F    | Sur litoral                | Puerto Montt | Miraflores             |
| G    | Sur interior               | Temuco       | Las Encinas            |
| H    | Extremo sur                | Coyhaique    | Coyhaique              |

#### Metodología de modelación

El problema de simular un TABS puede llevarse a cabo con diferentes softwares. Aunque los modelos CFD son los que arrojan los resultados más prolijos, para el acoplamiento con un modelo de edificio no es necesaria tanta exactitud y pueden emplearse modelos simplificados. Una de las posibilidades es restringir a dos dimensiones los modelos de elementos finitos (Su et al., 2015). En otra línea distinta, en este trabajo se ha utilizado el software EES (Klein & Nellis, 2012).

EES es un software académico muy útil en la resolución de problemas de termodinámica, mecánica de fluidos y transferencia de calor, debido a las múltiples funciones incorporadas en su librería. Identifica y agrupa automáticamente en bloques las ecuaciones que deben ser resueltas de manera simultánea, lo cual simplifica el proceso de programación del usuario. Proporciona herramientas útiles para el cálculo ingenieril de propiedades termo-físicas y matemáticas. Así, permite al usuario concentrarse más en el diseño del modelo que en su resolución debido a la complejidad matemática que pueda constituir el problema.

Con este software se ha desarrollado un modelo paramétrico que incorpora las principales ganancias y pérdidas de energía del edificio además de la energía que aporta (o disipa) el TABS y, mediante un modelo transiente, finalmente calcula la temperatura de aire interior, que es el parámetro escogido para asegurar el cumplimiento de las condiciones de confort térmico.

Estrictamente hablando, el proceso de transferencia de calor en el interior de un elemento de hormigón activado térmicamente se trata de un complejo problema en 3D, sin embargo, desde un punto de vista práctico no es necesario realizar un modelo de temperaturas y flujo de calor con ese nivel de detalle. Es posible utilizar herramientas más sencillas capaces de reproducir fielmente las variables de interés. El principal reto es el de modelizar la transferencia de calor que se produce en el interior de la losa de hormigón tanto en su funcionamiento activo (cuando circula el fluido caloportador por las tuberías), como en un funcionamiento pasivo, (la masa térmica acondiciona el interior del recinto sin la necesidad de una fuente o sumidero de energía). En este sentido, en el trabajo se ha combinó un modelo estacionario basado en resistencias térmicas y un modelo transiente que integra la acumulación térmica en el material.

Para el estado estacionario se ha adoptado el modelo de resistencias térmicas basado en la norma UNE (AENOR, 2009), que ha sido adoptado por EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research). En este modelo, a partir de la analogía eléctrica, es posible plantear el problema como una red en estrella de resistencias desde la temperatura del agua  $T_{ws}$  hasta la temperatura de las estancias superior  $T_1$  e inferior  $T_2$ , tal como se muestra en la siguiente figura 4

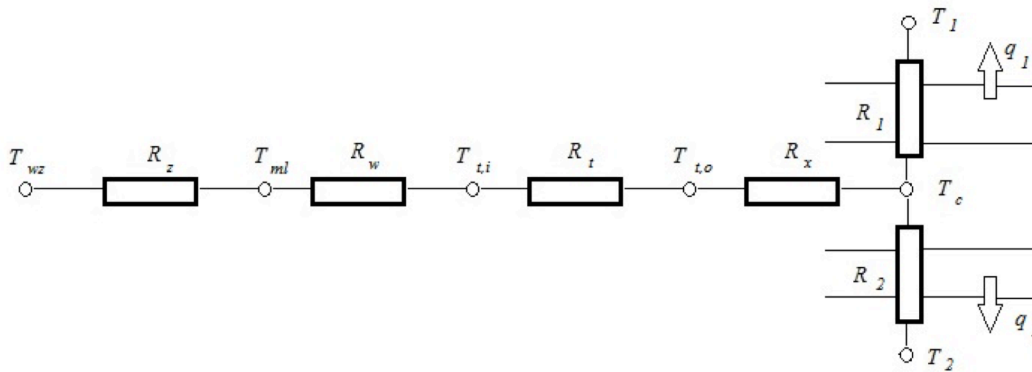


Fig. 4. EMPA/UNE: Modelo de resistencias para núcleo de hormigón activado

En ella, las resistencias térmicas  $R_1$  y  $R_2$  se refieren a la transferencia de calor desde la temperatura del núcleo hacia la estancia superior e inferior y se calculan como:

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_i} = \frac{1}{U_i} \quad (1)$$

La resistencia térmica  $R_x$  es responsable de la diferencia de temperatura entre la superficie exterior del tubo y la temperatura del núcleo de hormigón, siendo independiente del espesor de esta capa, como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$R_x = \frac{d_x \ln\left(\frac{d_x}{\pi d_{t,0}}\right)}{2\pi\lambda_t} \quad (2)$$

A ellas se agregan las resistencias térmicas causantes de la transferencia de calor por conducción a través de la pared del tubo  $R_t$

$$R_t = \frac{\ln\left(\frac{d_{t,0}}{d_{t,i}}\right) d_x}{2\pi\lambda_t} \quad (3)$$

Y por convección forzada en su interior,  $R_w$

$$R_w = \frac{1}{h_w} \quad (4)$$

Con  $h_w$ , coeficiente de transmisión superficial del calor en la capa de agua en contacto con la pared interior, que se relaciona con los números de Prandtl,  $Pr$ , y Reynolds,  $Re$ , del flujo mediante la expresión:

$$0,023Pr^{0,3}Re^{0,8} = \frac{h_w d_{t,i}}{\lambda_t} \quad (5)$$

Este modelo precisa de una última resistencia,  $R_z$ , que relaciona la temperatura media del agua en el serpentín con la temperatura de suministro,  $T_{ws}$ , que es la que se usa en el controlador, y es función de la longitud del tubo,  $L_t$ , y el caudal de agua. Se obtiene con la expresión:

$$R_z = \frac{d_x L_t}{\dot{m}_w c_w \left(1 - \exp\left(-\frac{d_x L_t}{R_k \dot{m}_w c_w}\right)\right)} - R_k \quad (6)$$

Donde  $R_k$  es la suma de las resistencias ya definidas previamente:

$$R_k = R_w + R_t + R_x + \frac{1}{U_1 + U_2} \quad (7)$$

Por su parte, el estudio de estado transiente proporciona una caracterización del efecto de acumulación de energía en el hormigón. Además, permite analizar el efecto auto-regulador de los TABS, el efecto del encendido y apagado de la bomba, y el potencial de almacenamiento térmico. Por ello, el modelo resistivo estacionario debe complementarse con un estudio que refleje la variación de los estados en función del tiempo. Es posible abordar de forma simplificada este problema mediante una ecuación diferencial con un valor inicial de temperatura  $T_0$  para conocer la temperatura de un elemento en un instante dado  $T_{i+1}$

La ecuación de balance utilizada es:

$$\dot{q}_w - \dot{q}_1 - \dot{q}_2 = m_c c_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial t} \quad (8)$$

El flujo de calor aportado por el agua  $\dot{q}_w$  se disipa a través de las superficies en contacto con los ambientes 1 y 2 y se acumula en el hormigón, variando su energía interna  $U$  y en última instancia su temperatura  $T_c$ , que es la incógnita de la ecuación, resuelta por el método numérico de Euler.

Por último, para introducir en el esquema el comportamiento activo o pasivo del TABS, sólo es necesario asumir que cuando la bomba no está funcionando, no existirá aporte o extracción de calor por parte del agua, o sea  $\dot{q}_w = 0$ , y el hormigón acondicionará los ambientes de forma pasiva debido a su energía interna. Mientras que cuando la bomba funciona se activa la losa de hormigón, y el calor que intercambia el agua se puede calcular como:

$$\dot{q}_w = \frac{T_{ws} - T_c}{R_c} \quad (9)$$

Con  $R_c$ , resistencia equivalente desde la temperatura de suministro del agua hasta la temperatura del núcleo de hormigón. Es decir:

$$R_c = R_z + R_w + R_t + R_x \quad (10)$$

Para obtener la temperatura del ambiente interior se ha establecido una ecuación de balance, que considera las ganancias y pérdidas del local y la emisión del TABS. Para ello, en el local se han hecho las siguientes hipótesis simplificadoras:

- Las ganancias solares que finalmente llegan al local a través de las ventanas se distribuyen como calor que es recibido por el suelo (30%), el techo (7%) y el resto (63%) es tratado como ganancia de energía en el volumen de control.
  - Se ha despreciado el intercambio radiante entre paredes. Así, el flujo radiante tanto de suelo como techo se incorporan íntegramente al aire.
  - El resto de muros también almacenan energía y, por lo tanto, también son parte de la masa térmica.
- La ecuación, también resuelta por el método de Euler, es la siguiente:

$$\dot{q}_{envolvente} + \dot{q}_{internas} + \dot{q}_{vent+inf} + \dot{q}_{suelo} + \dot{q}_{techo} + 0,63\dot{q}_{sol} = mc \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (11)$$

En esta ecuación los flujos procedentes de suelo y techo son los que transfiere el TABS (convectivo-radiantes) incrementados en cada caso por la parte proporcional de ganancias solares, según las respectivas absorptividades de los elementos constructivos.

#### Características del controlador

Debido a la integración del uso de la masa del edificio como almacenamiento térmico, la estrategia de control y el diseño de un controlador juegan un papel fundamental para lograr simultáneamente el confort térmico y la eficiencia energética durante su operación. Mucho se ha escrito sobre las estrategias de control para los TABS (Sourbron, 2012), que se dividen principalmente en modelos de control convencionales y modelos de control predictivos. Estos últimos permiten optimizar el comportamiento del sistema simultáneamente en términos de eficiencia energética y confort térmico. Sin embargo, tiene el inconveniente de requerir de mayor gasto computacional (Schmelas et. al, 2015). Por ello, dado que el objetivo de este trabajo no es optimizar la implementación del sistema sino establecer líneas generales de su funcionamiento, modelos de control y comportamiento en diversos climas, se ha estimado más conveniente usar un controlador convencional.

Un tipo de control convencional para un sistema radiante se lleva a cabo a partir del manejo coordinado de dos mecanismos: un control central que define una curva de la temperatura del agua en función de la temperatura exterior, y una variable de zona como realimentación (feedback) al sistema. Esta realimentación on/off cuenta con una banda muerta de temperaturas que evita las oscilaciones entre el funcionamiento de calefacción y enfriamiento. Este tipo de controlador es muy útil para obtener información importante sobre el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones. Sólo es requerida la curva de calefacción/enfriamiento, basada en un modelo estacionario. Bajo este sistema, es posible obtener un sistema bien controlado sin hacer uso de estrategias de control que requieran modelos complejos, permitiendo el análisis de la respuesta del edificio ante distintos ajustes del controlador hasta encontrar una buena combinación capaz de satisfacer las necesidades de confort térmico al interior del recinto.

La estrategia de control on/off con realimentación está basada en una temperatura continuamente medible,  $T_{controlled}$ , que no depende del funcionamiento de la bomba. El punto de ajuste,  $T_{set}$ , es el valor esperado de la variable controlada, y la banda  $\Delta T_h + \Delta T_c$  alrededor de este parámetro define los límites para calefacción  $T_{set,h}$  y refrigeración,

$T_{set,c}$ . Un sensor mide la  $T_{controlled}$  y transmite este valor al controlador quien lo compara con  $T_{set}$  y genera una acción correctiva hacia los dispositivos controlados que son el suelo y el techo del espacio.

En este caso es usado un controlador on/off de 3 etapas (figura 5) que ejecuta las siguientes acciones:

- Enciende la calefacción si  $T_{controlled} < T_{set} - \Delta T_h$
- No ejecuta acción si  $T_{set} - \Delta T_h < T_{controlled} < T_{set} + \Delta T_c$
- Enciende la refrigeración si  $T_{controlled} > T_{set} + \Delta T_c$

Para mayor comodidad,  $\Delta T_{min}$  y  $\Delta T_{max}$  se utilizan como parámetros de control, y se relacionan se la siguiente forma:

$$T_{set,h} = T_{set} - \Delta T_h = T_{min} + \Delta T_{min} \tag{12}$$

$$T_{set,c} = T_{set} + \Delta T_c = T_{max} - \Delta T_{max} \tag{13}$$

El agente de control es el agua para calefacción o enfriamiento suministrada al TABS, cuya temperatura de suministro depende de las curvas de calefacción y enfriamiento, las cuales son tomadas en base a un modelo elaborado por Sourbron [19] para un edificio de oficinas de dos zonas en un clima moderado. Estas curvas pueden ser adaptadas mediante los factores de corrección  $CF_{hsv}$  y  $CF_{csv}$  (figura 6), dando lugar a un nuevo valor de ajuste para la temperaturas de suministro de agua,  $T_{ws,hsv}$  y  $T_{ws,csv}$ .

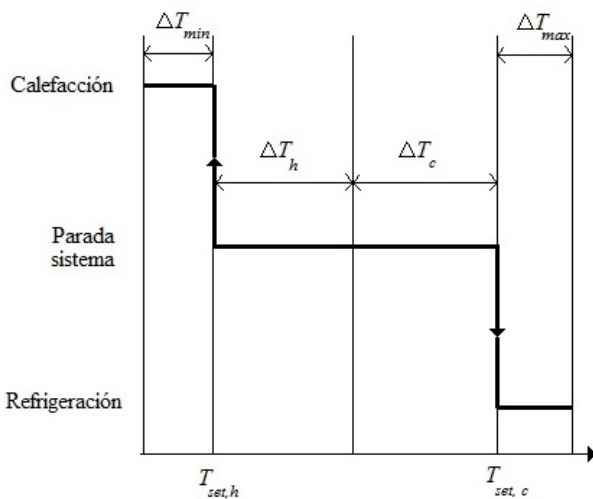


Figura 5. Etapas del controlador.

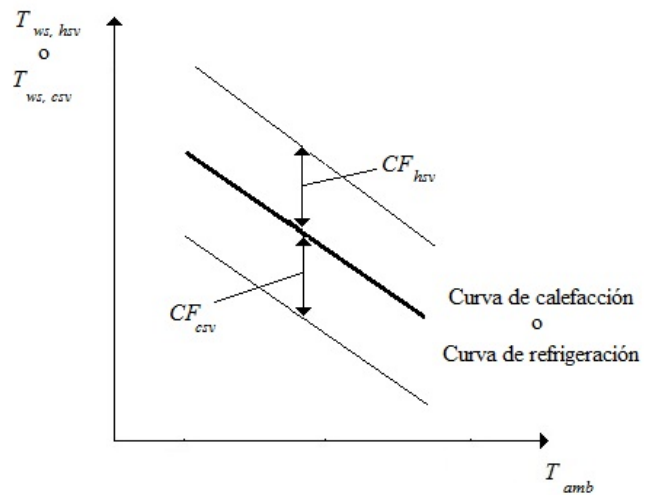


Figura 6. Influencia de los factores de corrección de las curvas de calefacción y/o refrigeración.

Tal como se ha mencionado anteriormente, el modelo convencional otorga resultados globales como respuesta a distintos ajustes de los parámetros del controlador. Esto implica que la configuración debe personalizarse para cada zona climática estudiada, ya que en cada una de ellas usa la combinación de ajustes que otorga los mejores resultados en términos de confort térmico.

La tabla 7 muestra los ajustes comunes a todas las zonas climáticas. Los ajustes del controlador particularizados para cada zona pueden consultarse en la tabla 8.

Tabla 7. Ajustes comunes del controlador

|                                 |  |       |
|---------------------------------|--|-------|
| <b>Curva de calefacción</b>     | $T_{ws,hsv} = -0,22T_{oa} + 25,1 + CF_{hsv}$ |       |
| <b>Curva de refrigeración</b>   | $T_{ws,csv} = -0,16T_{oa} + 23,3 + CF_{csv}$ |       |
| $T_{controlled}$                | Temperatura interior del aire ( $T_{ia}$ )   |       |
| $T_{set}$                       | $T_{ia} = 23$                                |       |
| $\Delta T_{max}/\Delta T_{min}$ | Lunes a viernes                              | 26/21 |
|                                 | Sábado y domingo                             | 27/20 |

**Tabla 8.** Ajustes del controlador según zona y temporada

|          | $CF_{hsv}/CF_{csv}$ | $\Delta T_{min}/\Delta T_{max}$ |         |         |         |         |
|----------|---------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|          |                     | Ene-Feb                         | Mar-Abr | May-Ago | Sep-Oct | Nov-Dic |
| <b>A</b> | +6/-6               | 0/1                             | 0/1     | 0/0,5   | 0/1     | 0/1     |
| <b>B</b> | +6/-6               | 0/1                             | 0/1     | 0/0,5   | 0/1     | 0/1     |
| <b>C</b> | +3/-3               | 0,5/1                           | 0/1     | 0/1     | 0/1     | 0,5/1   |
| <b>D</b> | +3/-3               | 0/2                             | 0/1     | 0/0     | 0/1     | 0/2     |
| <b>E</b> | +3/-3               | 0,5/1                           | 0/1     | 0/1     | 0/1     | 0,5/1   |
| <b>F</b> | +6/-6               | 0/0                             | 0/1     | 0/0,5   | 0/1     | 0/1     |
| <b>G</b> | +3/-3               | 0/2                             | 0/1     | 0/0     | 0/1     | 0/2     |
| <b>H</b> | +3/-3               | 0/1                             | 0/1     | 0,5/0   | 0/1     | 0/1     |

Es importante recalcar que la mayoría de los resultados que se presentan en la siguiente sección (especialmente la demanda de energía y el régimen de funcionamiento de la bomba del TABS) dependen directamente de estos parámetros del controlador. Esto implica que los resultados obtenidos tienen cierta sensibilidad a los criterios utilizados para diseñar el mecanismo de control tanto del accionamiento de la bomba como de la temperatura del agua.

## Resultados y discusión

El modelo descrito se ha aplicado a las localidades seleccionadas con los siguientes resultados:

### Cargas térmicas

Como es suficientemente conocido, en las cargas térmicas de los edificios no residenciales de uso oficina predominan las ganancias internas (figura 7), aspecto que sólo puede mejorarse mediante equipos más eficientes, pero siempre con un potencial de reducción limitado.

Debido a las grandes superficies expuestas al ambiente, la envolvente térmica (incluyendo su efecto en las infiltraciones) es un parámetro de gran relevancia, especialmente en zonas con temperaturas más extremas. En el caso analizado las ganancias por radiación no son muy elevadas, pues se ha tenido especial cuidado en la protección solar de elementos acristalados.

### Demandas térmicas del sistema

En la figura 8 se puede apreciar la diferencia que existe en cuanto a la energía total demandada en cada una de las zonas. Si bien las diferencias no son significativas, se puede apreciar que la zona norte (Huasco, Calama y Salamanca) es la que demanda una mayor cantidad de energía para mantener las condiciones de confortabilidad. Esto radica principalmente en que requieren una mayor cantidad de energía destinada al enfriamiento del recinto, superior a la que se requiere en el resto del país. Dado que las ganancias internas y la protección son iguales para todos los modelos, este aumento de energía requerida para el enfriamiento se basa en las ganancias a través de la envolvente y las ganancias solares.

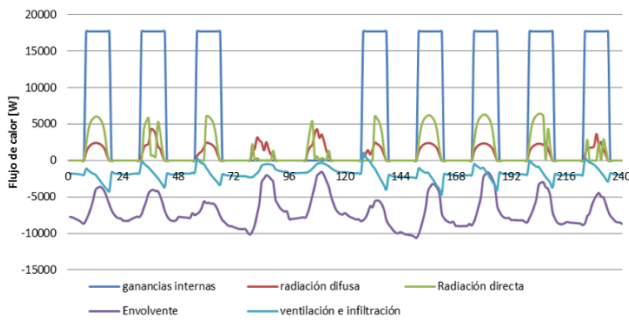


Figura 7. Ejemplo de evolución de cargas térmicas para la localidad de Huasco.

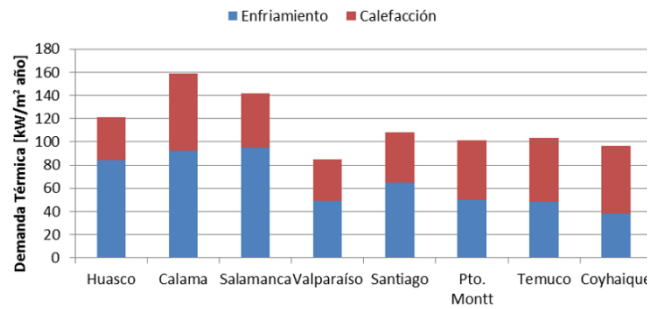


Figura 8. Demanda térmica (calefacción y refrigeración) anual para las localidades analizadas.

En el norte predominan las altas temperaturas durante el verano, especialmente en las zonas interiores desérticas como Calama, que se caracterizan por sus altísimos niveles de radiación solar directa. Es por ello comprensible esta mayor demanda de energía para refrigeración. Por su parte, a diferencia de las zonas interiores, las zonas costeras de similar latitud, como Huasco, se caracterizan por tener temperaturas mínimas no tan bajas, por lo que la energía destinada a la calefacción en los meses fríos es sensiblemente menor. A esto sin duda contribuye que en estas zonas interiores la gran oscilación térmica dificulta el control de la temperatura interior, produciendo una alternancia en el funcionamiento del sistema entre calefacción y enfriamiento, lo que se traduce en un mayor consumo de energía y por lo tanto un uso ineficiente de la misma.

Se puede también apreciar que las localidades del sur de Chile (Temuco, Puerto Montt y Coyhaique) tienen un valor de demanda energética anual semejante a las de la zona central del país. Sin embargo, en ellas ocurre el fenómeno de que la energía térmica requerida anualmente para calefacción es igual o mayor que la requerida para enfriamiento. Este fenómeno puede ser explicado porque en esta zona las temperaturas mínimas comienzan a disminuir rápidamente con respecto a la zona central, siendo los inviernos lluviosos y fríos, lo que hace aumentar las pérdidas por infiltración y envoltente térmica que dependen fundamentalmente de la temperatura exterior, en especial durante los días sin ganancias internas (sábado y domingo).

Por último, las ciudades de la zona central, Valparaíso y Santiago, presentan una demanda energética menor, pero relativamente similar entre ellas (85 y 108 kW/m<sup>2</sup>año, respectivamente). Al detallar la demanda energética mensual en ambas ciudades (figura 9), se puede apreciar un comportamiento muy diferente: Valparaíso, como ciudad costera, requiere una potencia térmica para calefacción estable durante el año. En cambio, Santiago, ubicado en un valle interior, está inmerso en condiciones climáticas un poco más extremas con veranos más calurosos e inviernos con bajas temperaturas.

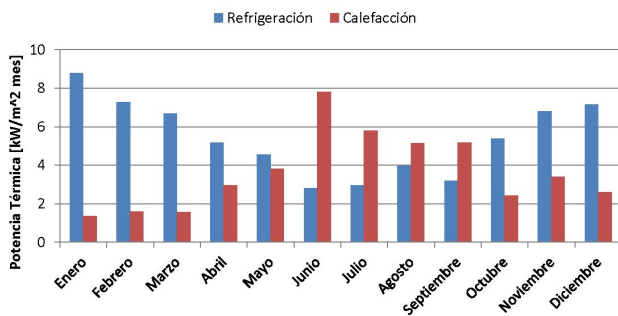


Figura 9 (a). Santiago. Evolución mensual de la demanda térmica (calefacción y refrigeración).

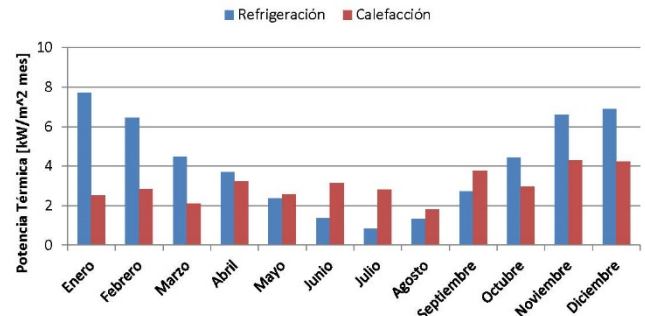


Figura 9 (b). Valparaíso. Evolución mensual de la demanda térmica (calefacción y refrigeración).

### Tiempo de funcionamiento del sistema

Otro factor importante a considerar es la cantidad de horas en las que el sistema activó el hormigón, o sea, que debía circular agua a través de las tuberías mediante el accionamiento de la bomba, siendo una consideración importante si se quiere evaluar en un trabajo futuro los costos asociados al funcionamiento de este sistema, y un parámetro a considerar para conocer el grado de control que se puede tener de los TABS.

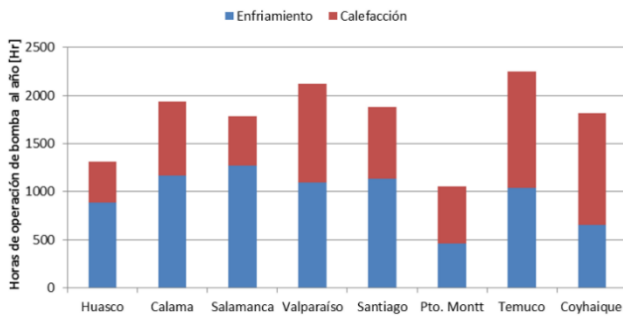


Figura 10. Horas anuales de funcionamiento de la bomba para las localidades estudiadas.

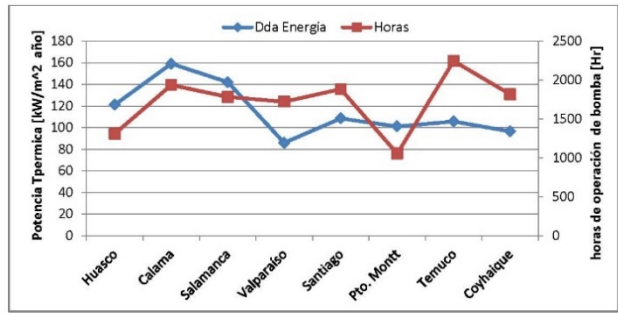


Figura 11. Demanda de energía vs horas de funcionamiento del sistema.

La figura 10 muestra las horas de operación de la bomba en los TABS durante el año en cada zona estudiada. No es posible realizar alguna conclusión sobre las horas de demanda de la bomba por zona, ya que no se logra apreciar un patrón de comportamiento según zona norte-centro-sur o costa-interior. Sin embargo, logra brindar información sobre la elección del sistema de control, el requerimiento de menos horas de uso de la bomba puede indicar un mejor ajuste del sistema de control para esa zona, o que las condiciones ambientales en la zona facilitan el control de los TABS. En este caso, Puerto Montt y Huasco requerirían una menor cantidad de horas del TABS en forma activa.

Analizando en conjunto la demanda energética y las horas de operación de la bomba en cada zona (figura 11) se observa que en las localidades de Calama y Salamanca existe una demanda de energía mayor, para un régimen de operación de la bomba semejante al de otras ciudades. Por otra parte, las ciudades en las zonas centro y sur del país requieren una cantidad de energía similar durante el año para mantener las condiciones de confort al interior del recinto. Sin embargo, la ciudad de Puerto Montt requiere una menor cantidad de horas de funcionamiento activo del TABS en comparación con las otras zonas. Esta diferencia, al igual que ocurre en el caso de Huasco, radica en el controlador escogido y en el factor de corrección de la curva de suministro de agua, ( $CF=6/-6$ , según lo indicado en la tabla 8) lo que supone temperaturas mayores para calefacción y menores para refrigeración y conlleva una mayor demanda de energía.

### Evolución de temperatura

De forma complementaria a lo analizado en las secciones anteriores, y a modo de ejemplo, se muestra a continuación la evolución de la temperatura interior obtenida con el modelo para dos localidades como Santiago y Valparaíso, que ejemplifican la diferencia entra clima costero y continental que se evidencia, con mayor o menor cuantía, a lo largo de todo el territorio continental chileno.

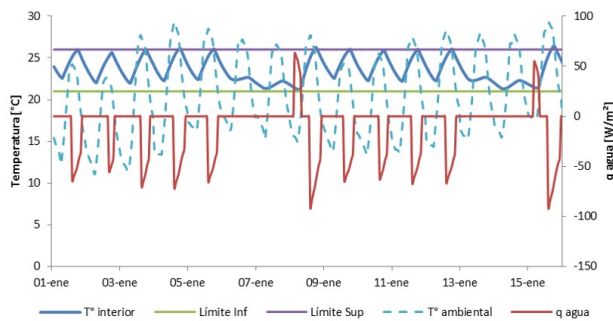


Figura 12 (a). Santiago. Evolución de temperaturas exterior e interior y potencia térmica del sistema para un día tipo de verano.

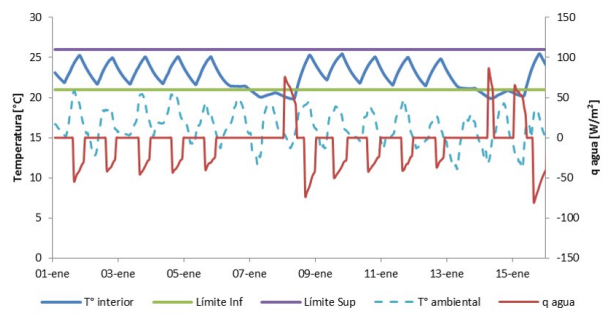


Figura 12 (b). Valparaíso. Evolución de temperaturas exterior e interior y potencia térmica del sistema para un día tipo de verano.

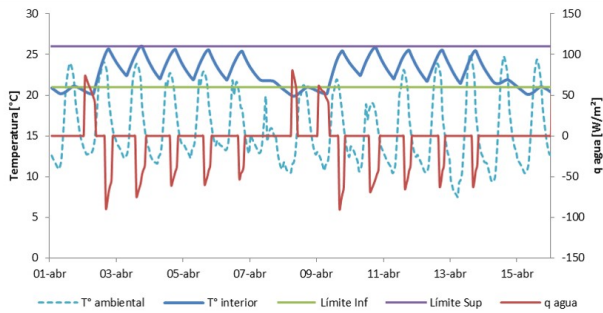


Figura 13 (a). Santiago. Evolución de temperaturas exterior e interior y potencia térmica del sistema para un día tipo de estación intermedia.

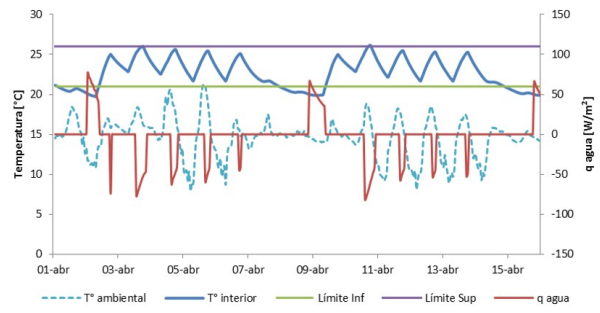


Figura 13 (b). Valparaíso. Evolución de temperaturas exterior e interior y potencia térmica del sistema para un día tipo de estación intermedia.

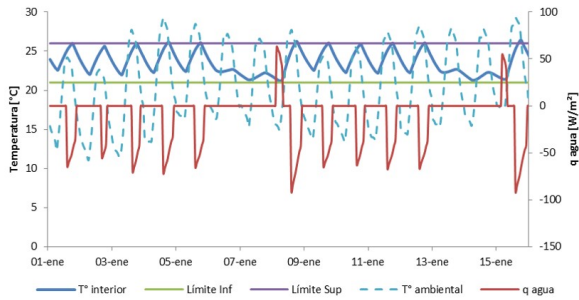


Figura 14 (a). Santiago. Evolución de temperaturas exterior e interior y potencia térmica del sistema para un día tipo de invierno.

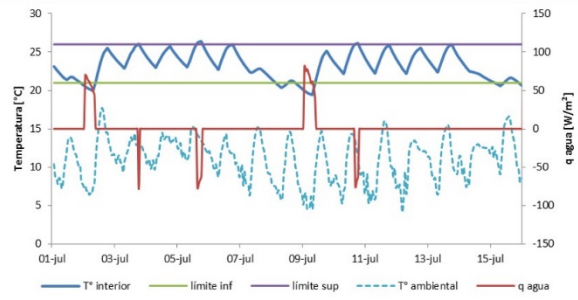


Figura 14 (b). Valparaíso. Evolución de temperaturas exterior e interior y potencia térmica del sistema para un día tipo de invierno.

## Conclusiones

En el estudio comparativo realizado se ha evaluado el potencial de implementación de los TABS en distintas zonas climáticas en Chile. Para ello se ha creado un modelo paramétrico que permite simular la variación diaria de la temperatura del aire en el interior de un edificio acondicionado mediante TABS, obteniendo la demanda energética requerida (energía transferida entre el agua y el núcleo de hormigón) y el tiempo de operación de la bomba al año. El modelo considera el comportamiento de las cargas térmicas por la envolvente, las ganancias solares, las ganancias internas y las cargas por ventilación e infiltración; siendo las ganancias internas las cargas predominantes durante la ocupación. Estas cargas hacen que durante la mayor parte del año se requiera refrigeración en el recinto. Sin embargo, durante los periodos sin ocupación, las cargas por infiltración y envolvente térmica predominan generando pérdidas de energía desde el recinto hacia el exterior, lo que conlleva a la necesidad de calefacción en estos periodos. Esta demanda de calefacción se incrementa a medida que las temperaturas exteriores son menores.

El sistema se ha implantado con un modelo de control convencional cuyo controlador central regula: (i) el accionamiento de la bomba (apertura y cierre de válvulas) a través de la medición de una variable de control, que en este caso es la temperatura del aire interior; y (ii) la temperatura de suministro del agua, que varía según la temperatura del aire exterior.

Los resultados del modelo muestran que la ciudad de Valparaíso (litoral central) presenta la menor demanda de energía ( $85 \text{ kWh/m}^2\text{-año}$ ), siendo la ciudad de Puerto Montt (litoral sur) la que presenta el menor tiempo de operación de la bomba ( $1055 \text{ horas/año}$ ). Esto significa que estos lugares son los que presentan un mayor potencial respecto al resto de zonas climáticas para utilizar los TABS. Además, las zonas del litoral en general tienen temperaturas más estables que a las zonas interiores, lo que implica que la oscilación de temperatura es menor durante el día, ayudando a disminuir la demanda de calefacción y refrigeración.

Por otro lado, la zona norte tiene una serie de desventajas: mayores ganancias externas producto de la mayor radiación incidente y mayores temperaturas máximas son contraproducentes con un edificio de oficinas, que intrínsecamente requiere refrigeración.

Por el contrario, en la zona sur interior y el extremo sur aumenta la demanda de calefacción, debido a las menores temperaturas de la zona, que incrementan las cargas por infiltración y la envolvente durante los días sin ocupación. Respecto al modelo de control implementado, el modelo convencional es útil para otorgar valiosa información sobre el comportamiento de los TABS. Sin embargo, no optimiza al máximo el potencial que poseen, ya que es susceptible



que ocurran episodios de alternancia entre calefacción y refrigeración durante el mismo día. Esto refleja una de las falencias del modelo de control convencional respecto al modelo predictivo, ya que es contraproducente enfriar un recinto cuando está descendiendo la temperatura exterior, lo que acelera la disminución de temperatura y aumenta la posibilidad de que el espacio requiera calefacción en algunas horas más si la noche es fría.

Es importante resaltar la relevancia que tienen en el resultado obtenido los parámetros de control adoptados (temperatura de referencia, temperatura controlada, límites de confort para el accionamiento de la bomba y curva de temperatura de suministro del agua). Esta selección se hace para garantizar el confort térmico de los espacios, por lo que puede afirmarse que el modelo concebido en el trabajo es muy sensible al criterio de confort térmico adoptado y al modo de controlar el sistema para lograrlo.

El trabajo realizado puede decirse que sienta las bases para el estudio de viabilidad de los TABS en edificios de oficinas de Chile y abre el camino para futuras investigaciones complementarias como:

- Estudio de alternativas a la generación convencional para producir agua para climatización.
- Mejora del sistema de control e integración en la fase de diseño del sistema
- Estudio del acoplamiento de sistemas de ventilación mecánica eficientes.
- Estudios de la influencia de modelos de confort adaptativo

## Agradecimientos

El trabajo se ha llevado a cabo con fondos del proyecto “Análisis sistémico de viabilidad de TABS en Chile” adjudicados en el Concurso de Proyectos de Investigación 2016 (línea proyectos multidisciplinarios) de la Dirección General de Investigación, Innovación y Postgrado de la Universidad Técnica Federico Santa María.

## Referencias

- AENOR (2006) UNE-EN ISO 7730. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local
- AENOR (2009) UNE-EN 15377. Sistemas de calefacción en edificios. Parte 1: Determinación de la capacidad nominal de diseño de calefacción y refrigeración. Parte 2: Diseño, dimensionado e instalación
- ASHRAE (2013) Fundamentals, American Society of Heating, Ventilation and Air Conditioning Engineers.
- De Dear, R.J. (2013) Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor Air*, 23, 442-461
- Fellin, F. y Sommer, K. (2003) Study of a low energy office building with thermal slabs and ground coupled heat pump. Proceedings 58<sup>th</sup> ATI Conference. Padua.
- Feustel, H.E. y Stetiu, C. (1995) Hydronic radiant cooling. Preliminary assessment *Energy and Buildings* 22, 193-205
- Henze, G.P. et al. (2008) Primary energy and comfort performance of ventilation assisted thermo-active building systems in continental climates. *Energy and Buildings*. 40, 99-111
- Klein, S. y Nellis, G. (2012) Mastering EES, F-Chart Software
- Kolarik, J. (2011) Simulation of energy use, human thermal comfort and office work performance in buildings with moderately drifting operative temperatures. *Energy and Buildings* 43 (11), 2988-2997
- Koschenz, M. y Dorer, V. (1999) Interaction of an air system with concrete core conditioning. *Energy and Buildings* 30, 139-145
- Lehmann, B. et al. (2011) Thermally activated building systems (TABS): Energy efficiency as a function of control strategy, hydronic circuit topology and (cold) generation system. *Applied Energy* 88, 180-191
- MINVU (2014) Anteproyecto de norma NTM11/2 Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento ambiental de las edificaciones. Parte 2: Comportamiento higrotérmico
- Moe, K. (2010) *Thermally Activated Surfaces in Architecture*. Princeton Architectural Press.
- Olesen, B.W. (2000) Hydronic radiant and cooling of buildings using pipes embedded in the building structure. 41 AICARR Conference, Milán.
- Schmelas, M. et al. (2015) Adaptive predictive control of thermo-active building systems (TABS) based on a multiple regression algorithm. *Energy and Buildings* 103, 14-28
- Sourbron, M. (2012) Dynamic thermal behaviour of buildings with concrete core activation. pp. 157-160. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería, KU Leuven.
- Su, L. et al. (2015) Heat transfer and cooling characteristics of concrete ceiling radiant panel *Applied Thermal Engineering*, 84, 170-179