



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.

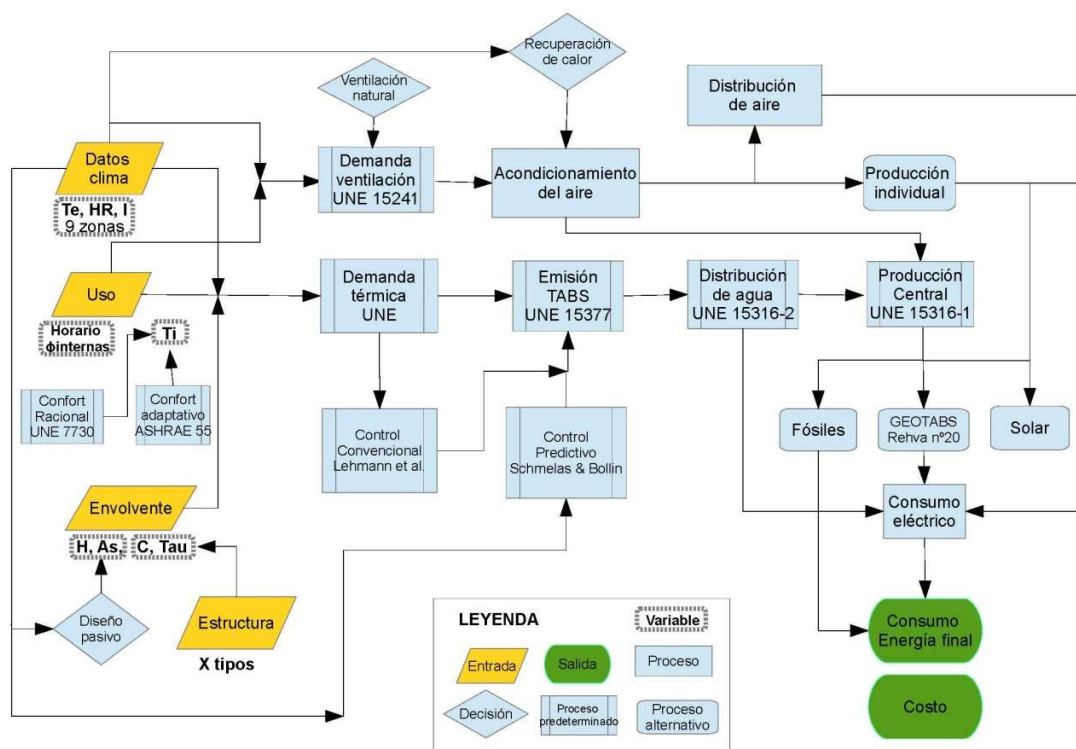


Fig. 1. Marco metodológico general

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).

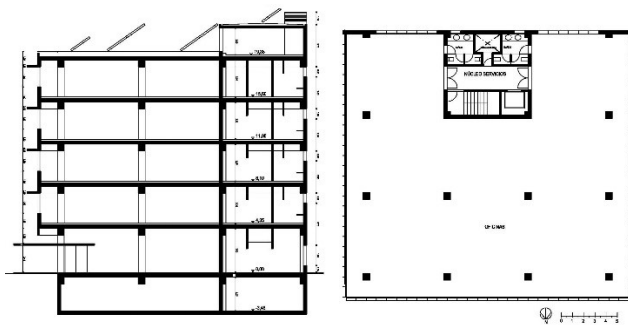


Figura 2. Edificio de oficinas analizado.
Planta tipo y sección.

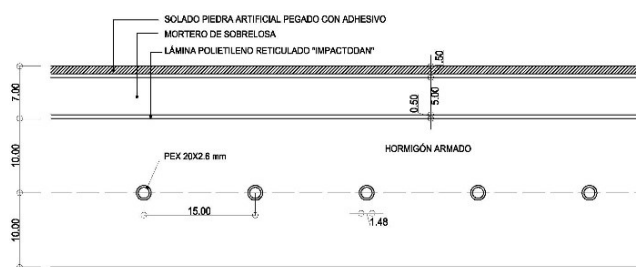


Figura 3. Detalle de losa activada térmicamente.
Cotas en cm

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)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	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)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	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 ²)	Vidrio exterior	Cámara (mm)	Vidrio interior	U (W/m ² 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 $\epsilon = 0,1$)

SHGC (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

IAC₀	0,25
IAC₆₀	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
Suelo	11 (W/m ² K)	7 (W/m ² K)	29 (°C)	
Techo	6 (W/m ² K)	11 (W/m ² 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.

Superficie útil oficinas	360 m ²
Tasa de ocupación	6 m ² /p
Número de ocupantes por planta	60 p
Ganancias por ocupantes	130 W/p
Ganancias por iluminación	8,1 W/m ²
Ganancias por equipos	8,61 W/m ²
Tasa de infiltración	0,2 ACH
Tasa de ventilación	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/hm² (400 kg/h, si se considera que cada circuito abastece a 25 m² 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 Sivica
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

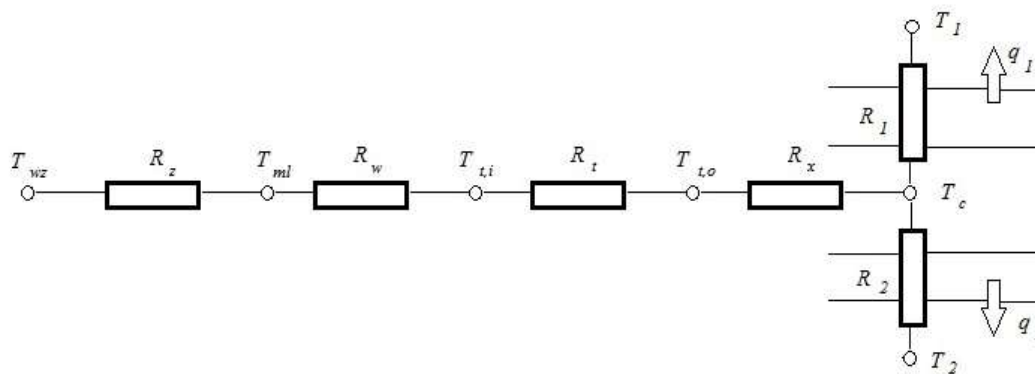


Fig. 4. EMPA/UNE: Modelo de resistencias para núcleo de hormigón activado

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:

$$\dot{q}_{envolvente} + \dot{q}_{internas} + \dot{q}_{vent+in} + \dot{q}_{suelo} + \dot{q}_{techo} + 0,63\dot{q}_{sol} = mc \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (11)$$

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, ΔT_{min} y ΔT_{max} se utilizan como parámetros de control, y se relacionan se la siguiente forma:

$$T_{set,h} = T_{set} - \Delta T_h = T_{min} + \Delta T_{min} \quad (12)$$

$$T_{set,c} = T_{set} + \Delta T_c = T_{max} - \Delta T_{max} \quad (13)$$

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 $T_{ws,csv}$.

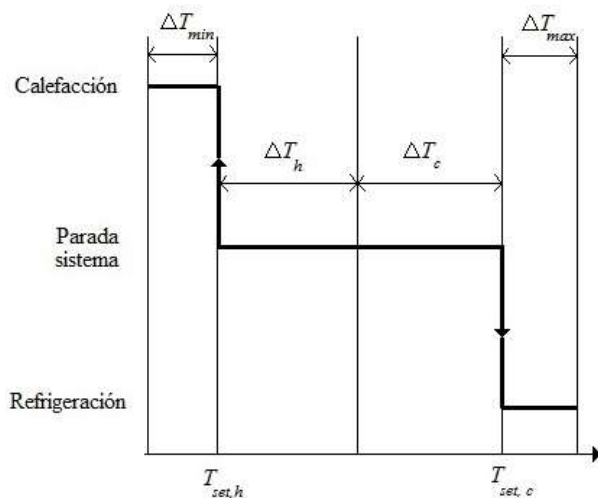


Figura 5. Etapas del controlador.

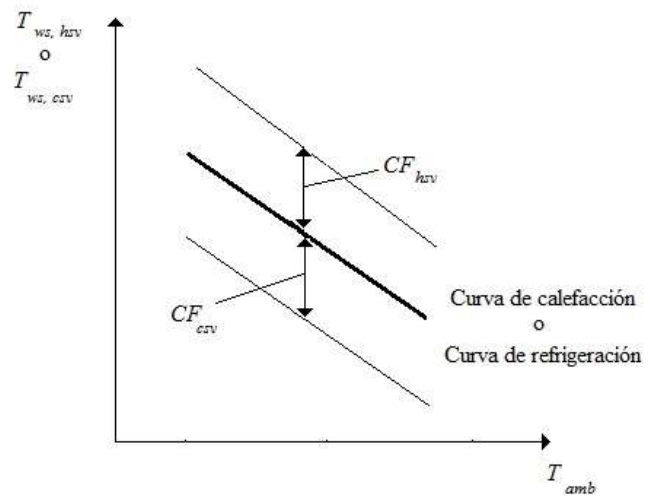


Figura 6. Influencia de los factores de corrección de las curvas de calefacción y/o refrigeración.

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

Curva de calefacción	$T_{ws,hsv} = -0,22T_{oa} + 25,1 + CF_{hsv}$	
Curva de refrigeración	$T_{ws,csv} = -0,16T_{oa} + 23,3 + CF_{csv}$	
$T_{controlled}$	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
A	+6/-6	0/1	0/1	0/0,5	0/1	0/1
B	+6/-6	0/1	0/1	0/0,5	0/1	0/1
C	+3/-3	0,5/1	0/1	0/1	0/1	0,5/1
D	+3/-3	0/2	0/1	0/0	0/1	0/2
E	+3/-3	0,5/1	0/1	0/1	0/1	0,5/1
F	+6/-6	0/0	0/1	0/0,5	0/1	0/1
G	+3/-3	0/2	0/1	0/0	0/1	0/2
H	+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.

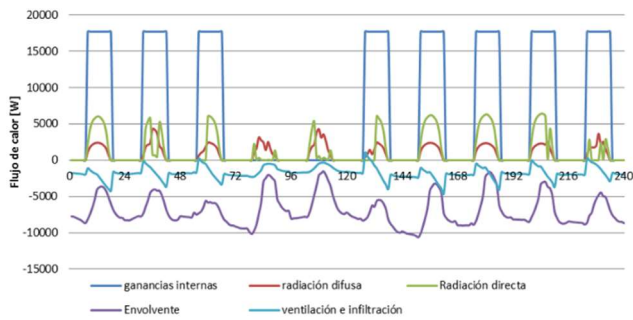


Figura 7. Ejemplo de evolución de cargas térmicas para la localidad de Huasco.

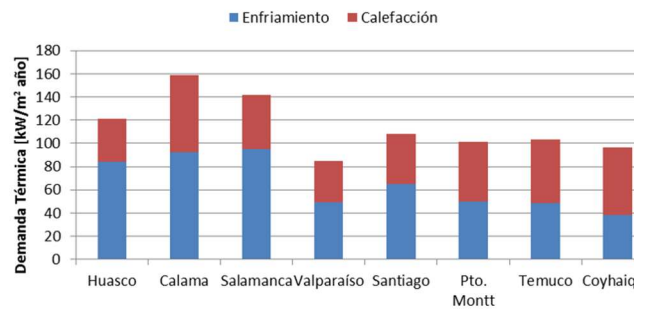


Figura 8. Demanda térmica (calefacción y refrigeración) anual para las localidades analizadas.

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 envolvente 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/m²año, 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.

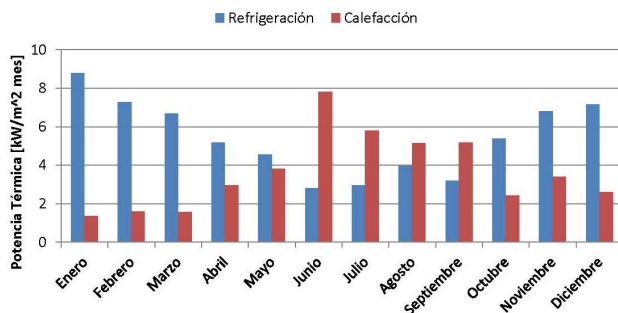


Figura 9 (a). Santiago. Evolución mensual de la demanda térmica (calefacción y refrigeración).

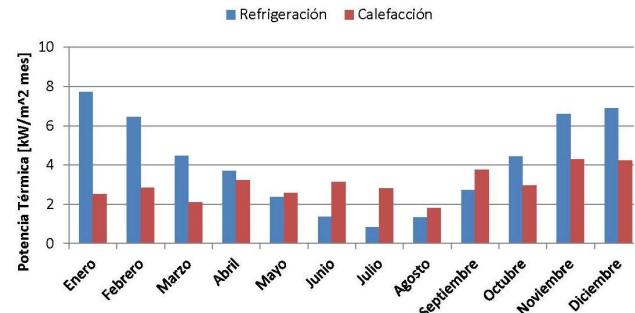


Figura 9 (b). Valparaíso. Evolución mensual de la demanda térmica (calefacción y refrigeración).

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.

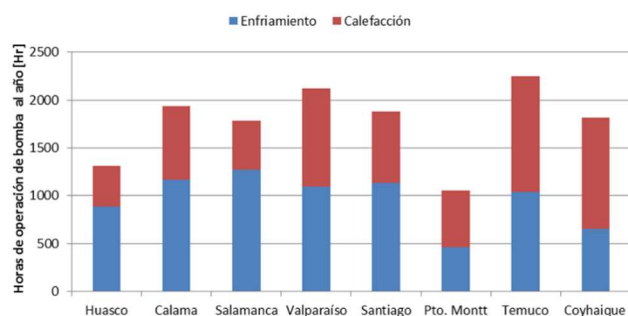


Figura 10. Horas anuales de funcionamiento de la bomba para las localidades estudiadas.

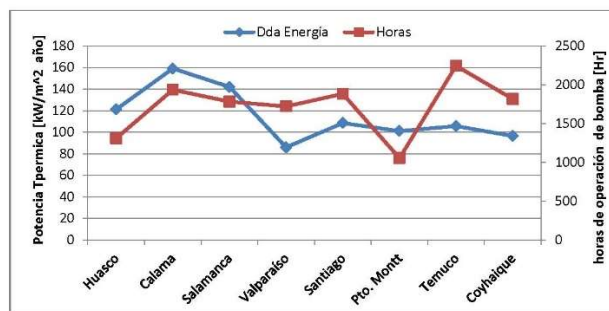


Figura 11. Demanda de energía vs horas de funcionamiento del sistema.

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 entre clima costero y continental que se evidencia, con mayor o menor cuantía, a lo largo de todo el territorio continental chileno.

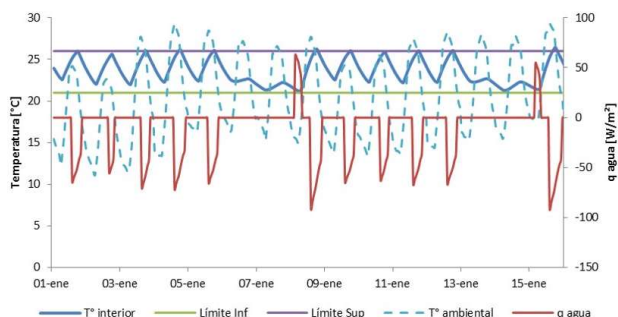


Figura 12 (a). Santiago. Evolución de temperaturas exterior e interior y potencia térmica del sistema para un día tipo de verano.

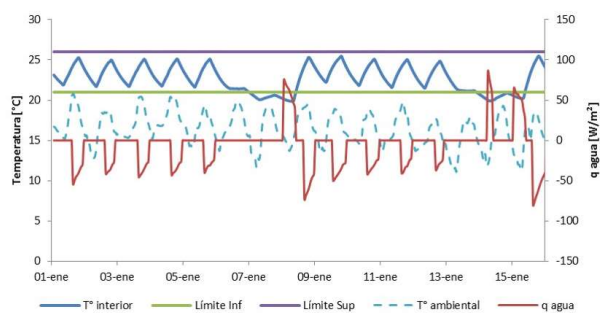


Figura 12 (b). Valparaíso. Evolución de temperaturas exterior e interior y potencia térmica del sistema para un día tipo de verano.

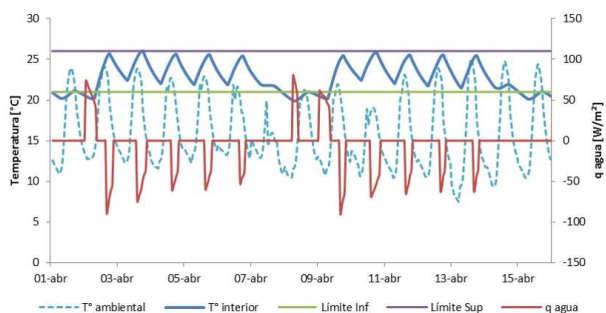


Figura 13 (a). Santiago. Evolución de temperaturas exterior e interior y potencia térmica del sistema para un día tipo de estación intermedia.

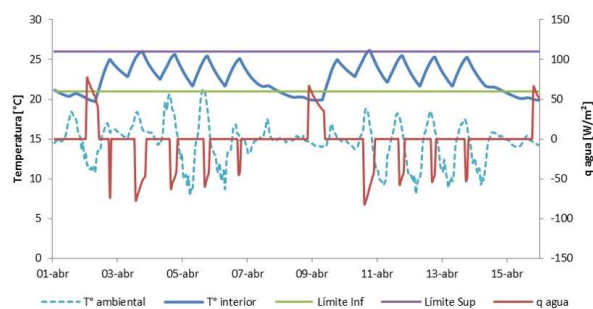


Figura 13 (b). Valparaíso. Evolución de temperaturas exterior e interior y potencia térmica del sistema para un día tipo de estación intermedia.

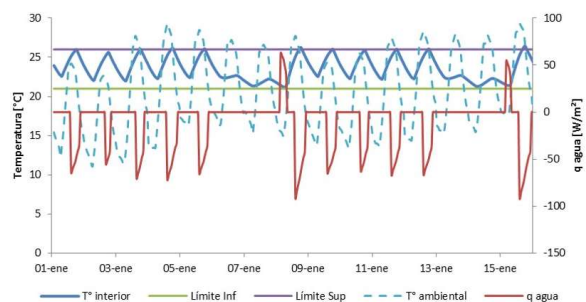


Figura 14 (a). Santiago. Evolución de temperaturas exterior e interior y potencia térmica del sistema para un día tipo de invierno.

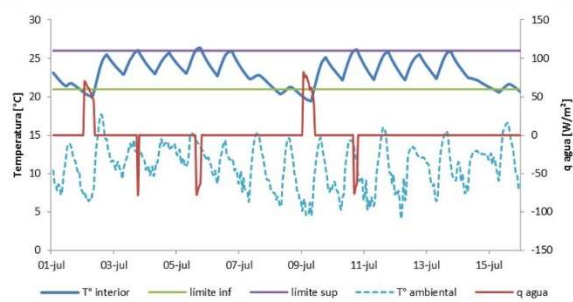


Figura 14 (b). Valparaíso. Evolución de temperaturas exterior e interior y potencia térmica del sistema para un día tipo de invierno.

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 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 58th 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

