



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

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

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

Pablo Sills

Filiación: Universidad Técnica Federico Santa María

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

Correo: 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 provienen 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 Albady 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 CO₂ 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 m². B es una edificación de 5 pisos ubicada en la comuna de Quilicura y tiene una superficie edificada de 1102 m². 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 ² °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 ² °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 ² °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/m²
- Equipamiento interior
 - o Consumo iluminación: 7.12 W/m²
 - o Consumo electrodomésticos: 17.38 W/m²
- 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/m²
 - o Fluorescentes compactas: 4.14 W/m²
 - o LED: 3.43 W/m²
- Tecnologías de electrodomésticos
 - o Convencionales: 17.38 W/m²
 - o A++: 11.02 W/m²
- 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/m²*°K, Valor max: 5.7 W/m²*°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.

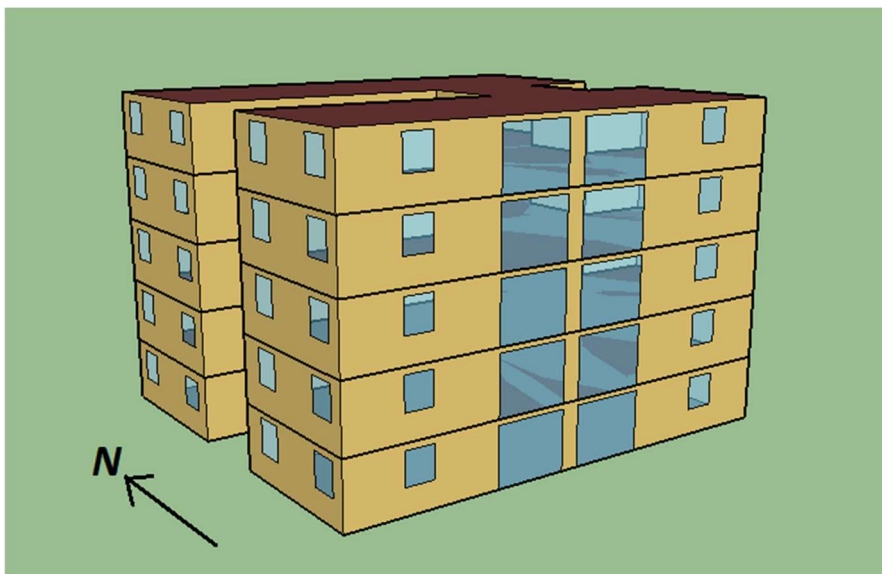


Figura 1. Modelo 3D edificación representativa A.

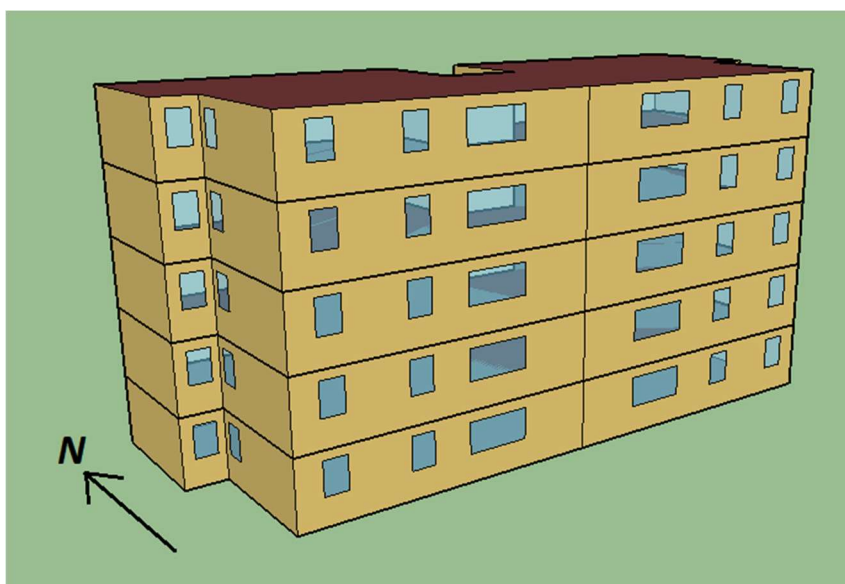


Figura 2. Modelo 3D edificación representativa B.

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

Ciudad	Edificación	Consumo eléctrico anual kWh/(m ² ·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 (cerca de 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						
		Espesor EPS muros	Espesor EPS techo	Espesor 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 9%, 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
- 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.

