

05-021

OPTIMIZING THE THERMAL ENVELOPE OF A SINGLE-FAMILY DWELLING IN SANTIAGO (CHILE) AND VERIFYING ITS COMPLIANCE WITH THERMAL REGULATION

López Ochoa, Luis María ⁽¹⁾; Carpio, Manuel ⁽²⁾; Las Heras Casas, Jesús ⁽¹⁾; López González, Luis María ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad de La Rioja, ⁽²⁾ Pontificia Universidad Católica de Chile

The Chilean residential sector is experiencing rapid growth, which implies a large increase in its energy consumption. In addition, the Chilean Thermal Regulation of the General Ordinance of Urban Planning and Constructions is presented as an opportunity to take advantage of the great potential for energy savings in the building sector. The objective of this work is to determine the optimal thermal insulation thickness of walls and roofs and to minimize both the total heating cost and the total heating and cooling cost of a newly constructed single-family dwelling in Santiago (Chile) by applying the life-cycle cost analysis method. The aim is to achieve the maximum possible net savings, taking into account the heating and cooling degree-days, the cost and properties of both the insulation and the fuel used, the main characteristics of the heating and cooling systems, the cost of electricity and the different economic parameters. The energy and environmental impact of this optimized thermal envelope is evaluated, and compliance with the Chilean Thermal Regulation is verified.

Keywords: optimized thermal insulation thickness; life-cycle cost analysis; thermal regulation; residential sector; Chile

OPTIMIZACIÓN DE LA ENVOLVENTE TÉRMICA DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR EN SANTIAGO (CHILE) Y COMPROBACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LA REGLAMENTACIÓN TÉRMICA

El sector residencial chileno está sufriendo un rápido crecimiento, lo que implica un gran aumento del consumo energético de dicho sector. Además, la Reglamentación Térmica de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones de Chile se presenta como una oportunidad para aprovechar el gran potencial de ahorro energético en el sector edificatorio. El objetivo de este trabajo es determinar el espesor de aislamiento térmico óptimo de muros y cubierta, con el que minimizar tanto el coste total de calefacción como el coste total de calefacción y refrigeración de una vivienda unifamiliar de nueva construcción en Santiago de Chile aplicando el método del análisis del coste del ciclo de vida. De esta forma se busca lograr los máximos ahorros netos posibles, teniendo en cuenta los grados-día de calefacción y refrigeración, el coste y propiedades tanto del aislante como del combustible empleado, las principales características de los sistemas generadores de calor y frío, el coste de la energía eléctrica y los diferentes parámetros económicos. Se evalúa el impacto energético y medioambiental de dicha envolvente térmica optimizada y se comprueba el cumplimiento de la Reglamentación Térmica chilena.

Palabras clave: espesor de aislamiento térmico optimizado; análisis del coste del ciclo de vida; reglamentación térmica; sector residencial; Chile

Correspondencia: Luis María López González luis-maria.lopez@unirioja.es



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El sector residencial chileno está experimentando un rápido crecimiento (Instituto Nacional de Estadísticas de Chile, 2020), siendo el responsable del 15% de la energía consumida del país, un país que importa el 60% del total de la energía primaria consumida (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2018). Un gran crecimiento, sin la toma de medidas oportunas, ocasiona un aumento del consumo energético, el cual tiene asociado un aumento de las emisiones de CO₂, además de una mayor dependencia del exterior. Por estos motivos, es importante enfocar esfuerzos en gestionar estrategias para la disminución de consumo energético en el sector residencial.

La Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2009) contiene la Reglamentación Térmica vigente, la cual se presenta como una oportunidad para aprovechar el gran potencial el ahorro energético del sector edificatorio (López-Ochoa et al., 2019). En el Artículo N° 4.1.10 de la OGUC (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2006a) se desarrollan todas las condiciones térmicas que deben de cumplir las diferentes soluciones constructivas de la envolvente térmica, en función de la zona climática donde se quiera construir.

La metodología del análisis del coste del ciclo de vida permite determinar el espesor de aislante óptimo para lograr los máximos ahorros netos posibles en términos de calefacción o calefacción y refrigeración, teniendo en cuenta los grados-día de calefacción y refrigeración, el coste y propiedades tanto del aislante como del combustible empleado, las principales características de los sistemas generadores de calor y frío, el coste de la electricidad y los diferentes parámetros económicos. Este método ha sido empleado en varios estudios como los llevados a cabo en Turquía (Kurekci, 2016), España (López-Ochoa et al., 2020) o Japón (Yuan, Farnham y Emura, 2017).

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es determinar el espesor de aislamiento térmico óptimo de muros y cubierta, con el que minimizar tanto el coste total de calefacción como el coste total de calefacción y refrigeración de una vivienda unifamiliar de nueva construcción en Santiago de Chile, aplicando el método del análisis del coste del ciclo de vida. Además, se evalúa el impacto energético y medioambiental de dicha envolvente térmica optimizada y se comprueba el cumplimiento de la Reglamentación Térmica de la OGUC (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2006a).

3. Metodología

3.1 Método del análisis del coste del ciclo de vida

En el presente trabajo, para realizar el análisis del coste del ciclo de vida, han sido extraídas y adaptadas las siguientes ecuaciones de Kurekci (2016) y López-Ochoa et al. (2020).

La transmitancia térmica de un cerramiento, U , en W/m²·K, se calcula con la siguiente ecuación:

$$U = \frac{1}{R_{total}} \quad (1)$$

donde R_{total} es la resistencia térmica total del cerramiento, en m²·K/W, calculándose con la siguiente ecuación:

$$R_{total} = R_{si} + \sum_i R_i + R_{se} \quad (2)$$

donde R_{si} y R_{se} son las resistencias térmicas superficiales interior y exterior, en $m^2 \cdot K/W$, respectivamente, y R_i es la resistencia térmica de la capa i del cerramiento, en $m^2 \cdot K/W$, calculándose con la siguiente ecuación:

$$R_i = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (3)$$

donde e_i es el espesor de la capa i del cerramiento, en m, y λ_i es la conductividad térmica del material de la capa i del cerramiento, en $m \cdot K/W$.

Además, R_{total} se puede expresar como:

$$R_{total} = R_{no\ aisl} + R_{aisl} \quad (4)$$

donde $R_{no\ aisl}$ es el sumatorio de todas las resistencias térmica, excepto la correspondiente a la capa de aislante, R_{aisl} , ambas en $m^2 \cdot K/W$.

El coste energético anual de calefacción y de refrigeración por unidad de superficie de intercambio, CE_{calef} y CE_{refrig} , respectivamente, en $\text{€/m}^2 \cdot \text{año}$, se calcula con la siguiente ecuación:

$$CE_{calef} = \frac{0,024 \cdot GDC \cdot p_{comb} \cdot U}{\eta} \quad (5)$$

$$CE_{refrig} = \frac{0,024 \cdot GDR \cdot p_{elect} \cdot U}{\varepsilon} \quad (6)$$

donde GDC son los grados-día de calefacción, GDR son los grados-día de refrigeración, p_{comb} es el precio del combustible empleado para calefacción, en €/kWh , p_{elect} es el precio de la energía eléctrica empleada para refrigeración, en €/kWh , η es el rendimiento térmico de la caldera empleada, en tanto por uno, y ε es la eficiencia térmica del sistema de producción de frío empleado, en tanto por uno.

El coste total de calefacción por unidad de superficie de intercambio, CT_{calef} , en €/m^2 , se calcula con la siguiente ecuación:

$$CT_{calef} = CE_{calef} \cdot FVA + C_{aisl} \quad (7)$$

donde FVA es el factor del valor actual, calculándose con la siguiente ecuación:

$$FVA = \begin{cases} \frac{\left(\frac{1+g-i}{1+i}\right)^N - 1}{\frac{g-i}{1+i} \left(1 + \frac{g-i}{1+i}\right)^N}, & \text{si } i < g \\ \frac{N}{1+i}, & \text{si } i = g \\ \frac{\left(1 + \frac{i-g}{1+g}\right)^N - 1}{\frac{i-g}{1+g} \left(1 + \frac{i-g}{1+g}\right)^N}, & \text{si } i > g \end{cases} \quad (8)$$

donde i es la tasa de interés, en tanto por uno, g es la tasa de inflación, en tanto por uno, y N es el periodo de vida útil, en años,

y C_{aisl} es el coste del aislante por metro cuadrado de superficie de intercambio, en €/m^2 , calculándose con la siguiente ecuación:

$$C_{aisl} = p_{aisl} \cdot x \quad (9)$$

donde p_{aisl} es el precio del aislante empleado, en €/m³, y x es el espesor de aislante empleado, en m.

El ahorro total energético anual para el cerramiento optimizado para calefacción por unidad de superficie de intercambio, ATE_{calef} , en €/m²·año, se calcula con la siguiente ecuación:

$$ATE_{calef} = CE_{sin\ aislante}^{calef} - CE_{con\ aislante}^{calef} \quad (10)$$

donde $CE_{sin\ aislante}^{calef}$ y $CE_{con\ aislante}^{calef}$ son los costes energéticos anuales de calefacción por unidad de superficie de intercambio del cerramiento sin aislante y del cerramiento con aislante, en €/m²·año.

El periodo de retorno para el cerramiento optimizado para calefacción, PP_{calef} , en años, se calcula con la siguiente ecuación:

$$PP_{calef} = \frac{C_{aisl}}{ATE_{calef}} \quad (11)$$

Aplicando el análisis del coste del ciclo de vida, el espesor de aislante óptimo que minimiza el coste total de calefacción por unidad de superficie de intercambio, x_{opt}^{calef} , en m, se calcula con la siguiente ecuación:

$$x_{opt}^{calef} = \left(\frac{0,024 \cdot GDC \cdot p_{comb} \cdot FVA \cdot \lambda}{p_{aisl} \cdot \eta} \right)^{0,5} - \lambda \cdot R_{no\ aisl} \quad (12)$$

El coste total de calefacción y refrigeración por unidad de superficie de intercambio, $CT_{cal+ref}$, en €/m², se calcula con la siguiente ecuación:

$$CT_{cal+ref} = CE_{calef} \cdot FVA + CE_{refrig} \cdot FVA + C_{aisl} \quad (13)$$

El ahorro total energético anual para el cerramiento optimizado para calefacción y refrigeración por unidad de superficie de intercambio, $ATE_{cal+ref}$, en €/m²·año, se calcula con la siguiente ecuación:

$$ATE_{cal+ref} = (CE_{sin\ aislante}^{calef} + CE_{sin\ aislante}^{refrig}) - (CE_{con\ aislante}^{calef} + CE_{con\ aislante}^{refrig}) \quad (14)$$

donde $CE_{sin\ aislante}^{refrig}$ y $CE_{con\ aislante}^{refrig}$ son los costes energéticos anuales de refrigeración por unidad de superficie de intercambio del cerramiento sin aislante y del cerramiento con aislante, en €/m²·año.

El periodo de retorno para el cerramiento optimizado para calefacción y refrigeración, $PP_{cal+ref}$, en años, se calcula con la siguiente ecuación:

$$PP_{cal+ref} = \frac{C_{aisl}}{ATE_{cal+ref}} \quad (15)$$

Aplicando el análisis del coste del ciclo de vida, el espesor de aislante óptimo que minimiza el coste total de calefacción y refrigeración por unidad de superficie de intercambio, $x_{opt}^{cal+ref}$, en m, se calcula con la siguiente ecuación:

$$x_{opt}^{cal+ref} = \left[\frac{0,024 \cdot FVA \cdot \lambda}{p_{aisl}} \cdot \left(\frac{GDC \cdot p_{comb}}{\eta} + \frac{GDR \cdot p_{elect}}{\varepsilon} \right) \right]^{0,5} - \lambda \cdot R_{no\ aisl} \quad (16)$$

Para pasar de evaluar un parámetro por unidad de superficie de intercambio, $Param_{inter}$, a por unidad de superficie habitable, $Param_{habit}$, se emplea la siguiente ecuación:

$$\text{Param}_{habit} = \text{Param}_{inter} \cdot \frac{S_{inter}}{S_{habit}} \quad (17)$$

donde S_{inter} es la superficie de intercambio, en m^2 , y S_{habit} es la superficie habitable, en m^2 .

Para las conversiones de energía final a energía primaria y de energía final a emisiones de CO_2 se han empleado, para los diferentes vectores energéticos, los factores de paso mostrados en la Tabla 1.

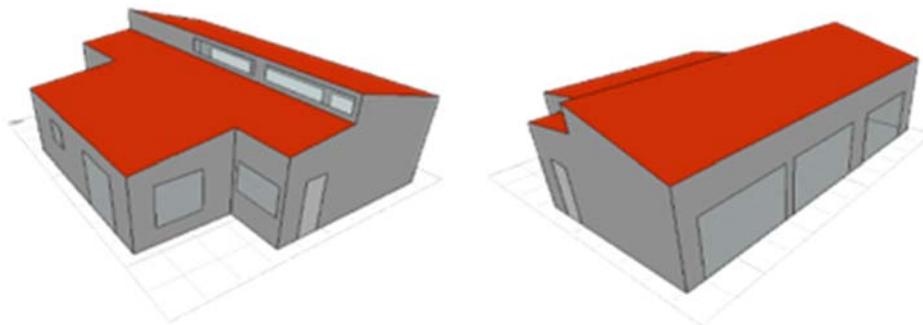
Tabla 1: Factores de paso de energía final a energía primaria y de energía final a emisiones de CO_2 para diferentes vectores energéticos (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2020).

Vector energético	Factor de paso de energía final a energía primaria (kWh_{EP}/kWh_{EF})	Factor de paso de energía final a emisiones de CO_2 ($kg\ CO_2/kWh_{EF}$)
Gas natural	1,10	0,202
Electricidad	1,90	0,307

3.2 Edificio de estudio y principales parámetros tenidos en cuenta

El edificio de estudio es una vivienda unifamiliar, con una superficie habitable de $63,68\ m^2$ (Figura 1), ubicado en Santiago de Chile. Se emplea una caldera de gas natural con un rendimiento térmico de 0,87 para cubrir las necesidades de calefacción y un sistema de refrigeración eléctrico con una eficiencia térmica de 2,00 para cubrir las necesidades de refrigeración.

Figura 1: Edificio de estudio.



Las superficies de intercambio de los elementos que constituyen la envolvente térmica del edificio de estudio se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Superficies de intercambio de los elementos que constituyen la envolvente térmica.

Elemento	Superficie de intercambio (m^2)
Cubiertas	85,50
Muros	98,40
Ventanas	28,50
Puertas	2,80
Solera	63,68

La transmitancia térmica de la solera es de $2,65\ W/m^2\cdot K$, la de las ventanas es de $2,92\ W/m^2\cdot K$, la de las puertas es de $3,80\ W/m^2\cdot K$. Las resistencias térmicas de las distintas capas que componen los elementos de la envolvente térmica estudiados, los muros y las cubiertas,

ordenados de exterior a interior, se muestran en la Tabla 3. Las resistencias superficiales se han obtenido de la Norma Chilena NCh 853-2007 (Instituto Nacional de Normalización de Chile, 2007).

Tabla 3: Composición de muros y cubiertas con sus resistencias térmicas.

Elemento	Capa	Material	Espesor (m)	Conductividad térmica (W·m/K)	Resistencia térmica (m ² ·K/W)
Muro	se	-	-	-	0,050
	1	Fibro cemento	0,008	0,220	0,036
	2	Tablero conglomerado OSB	0,011	0,280	0,040
	2	Yeso cartón	0,030	0,260	0,115
	4	Lana mineral	*	0,035	*
	5	Tablero conglomerado OSB	0,011	0,280	0,040
	6	Yeso Cartón	0,015	0,260	0,058
	si	-	-	-	0,12
Cubierta	se	-	-	-	0,05
	1	Panel de zinc HI RIB PP	0,001	210,000	0,000
	2	Tablero conglomerado OSB	0,011	0,280	0,040
	3	Poliestireno extruido	*	0,034	*
	4	Tablero conglomerado OSB	0,011	0,102	0,109
	si	-	-	-	0,090

Nota: * se determina mediante el método del análisis del coste del ciclo de vida.

Además, Santiago de Chile se encuentra en la zona climática 3 según el Manual de Aplicación de la Reglamentación Térmica de la OGUC (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2006b), y le corresponde 1.164 grados-día de calefacción y 434 grados-día de refrigeración para una temperatura base de 18,3°C durante el periodo 2016-2018 según ASHRAE (2020).

Los parámetros económicos tenidos en cuenta son una tasa de interés anual del 10,00%, una tasa anual de inflación del 3,00% y un periodo de vida útil de 30 años, así como los precios de los aislantes y vectores energéticos empleados (Tabla 4).

Tabla 4: Precios de los aislantes y vectores energéticos empleados.

	Precio
Lana mineral	119,29 €/m ³
Poliuretano extruido	70,75 €/m ³
Gas natural	0,12 €/kWh
Electricidad	0,12 €/kWh

3.3 Casos de estudio

Los casos de estudio son los siguientes:

- Caso 1: Edificio cuyas transmitancias térmicas se corresponden con las máximas exigidas por el Artículo N° 4.1.10 de la OGUC (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2006a): La transmitancia térmica de muros es de $1,90 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y la de cubiertas es de $0,47 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.
- Caso 2: Edificio cuyos muros y cubiertas se han optimizado para minimizar el coste total de calefacción.
- Caso 3: Edificio cuyos muros y cubiertas se han optimizado para minimizar el coste total de calefacción y refrigeración.

Inicialmente, se evalúan los costes totales, desglosados por costes energéticos y costes del aislante, y los ahorros totales, en función del espesor del aislante empleado, para todo el ciclo de vida, tanto para muros como para cubiertas, atendiendo a los criterios de optimización de minimizar el coste total de calefacción y el coste total de calefacción y refrigeración.

Posteriormente, se evalúan los espesores de aislante óptimo, las transmitancias térmicas, los costes del aislante, los ahorros totales energéticos anuales y los periodos de retorno, tanto para muros como para cubiertas, atendiendo a los criterios de optimización de minimizar el coste total de calefacción y el coste total de calefacción y refrigeración.

Finalmente se comprueba el cumplimiento del Artículo N° 4.1.10 de la OGUC (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2006a) y se evalúan para los servicios de calefacción y refrigeración los ahorros anuales en energía final, en energía primaria, en emisiones de CO_2 y económicos, atendiendo los criterios de optimización anteriormente mencionados.

4. Resultados

Los costes totales, desglosados en costes energéticos de calefacción y costes del aislante, para los muros y las cubiertas, en función del espesor del aislante empleado, para todo el ciclo de vida se muestran en la Figura 2; y los ahorros totales, considerando calefacción, para los muros y las cubiertas, en función del espesor del aislante empleado, para todo el ciclo de vida se muestran en la Figura 3.

Los costes totales, desglosados en costes energéticos de calefacción y refrigeración, y costes del aislante, para los muros y las cubiertas, en función del espesor del aislante empleado, para todo el ciclo de vida se muestran en la Figura 4; y los ahorros totales, considerando calefacción y refrigeración, para los muros y las cubiertas, en función del espesor del aislante empleado, para todo el ciclo de vida se muestran en la Figura 5.

Figura 2: Coste energético de calefacción, coste del aislante y coste total, en función del espesor de aislante, todos ellos por unidad de superficie de intercambio, para todo el ciclo de vida para muros (izq.) y cubiertas (dcha.).

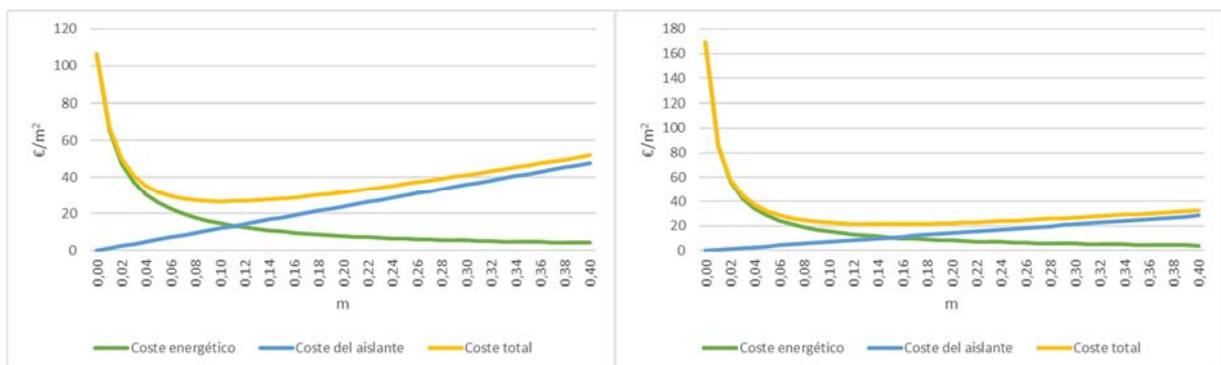


Figura 3: Ahorro total, considerando calefacción, en función del espesor de aislante, por unidad de superficie de intercambio, para todo el ciclo de vida para muros (izq.) y cubiertas (dcha.).

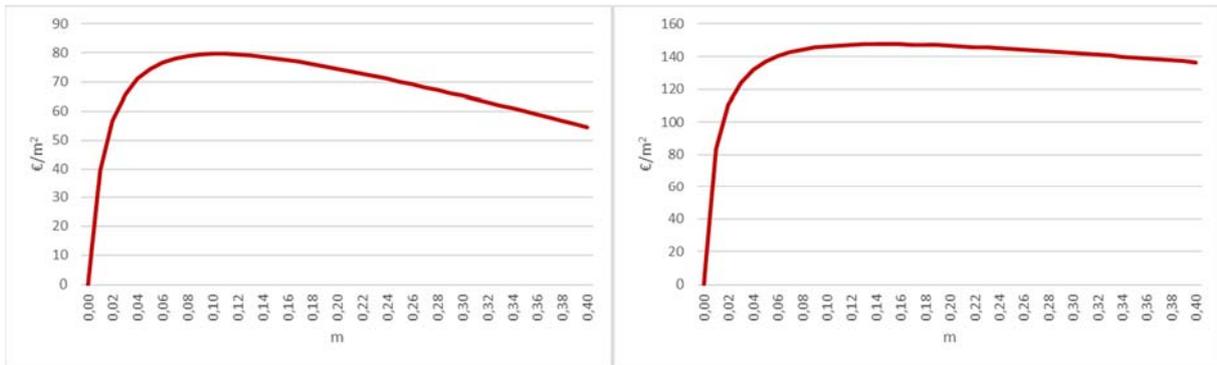


Figura 4: Coste energético de calefacción y refrigeración, coste del aislante y coste total, en función del espesor de aislante, todos ellos por unidad de superficie de intercambio, para todo el ciclo de vida para muros (izq.) y cubiertas (dcha.).

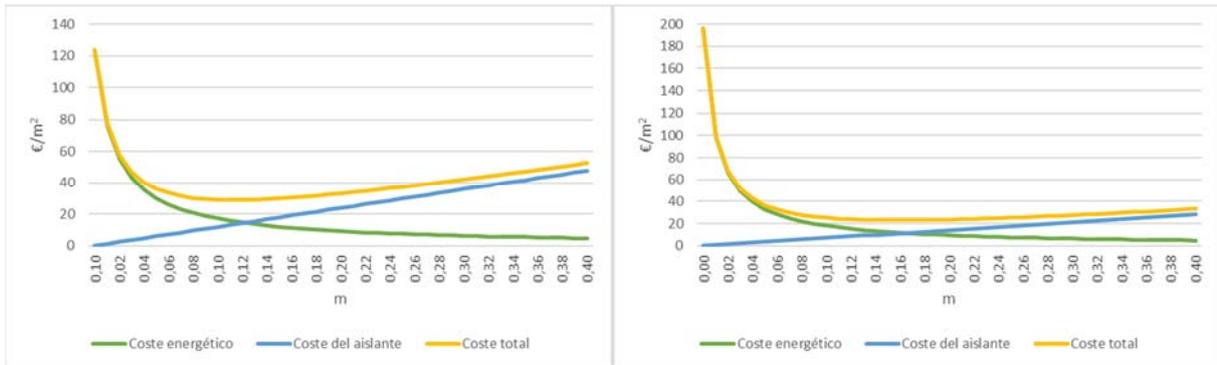
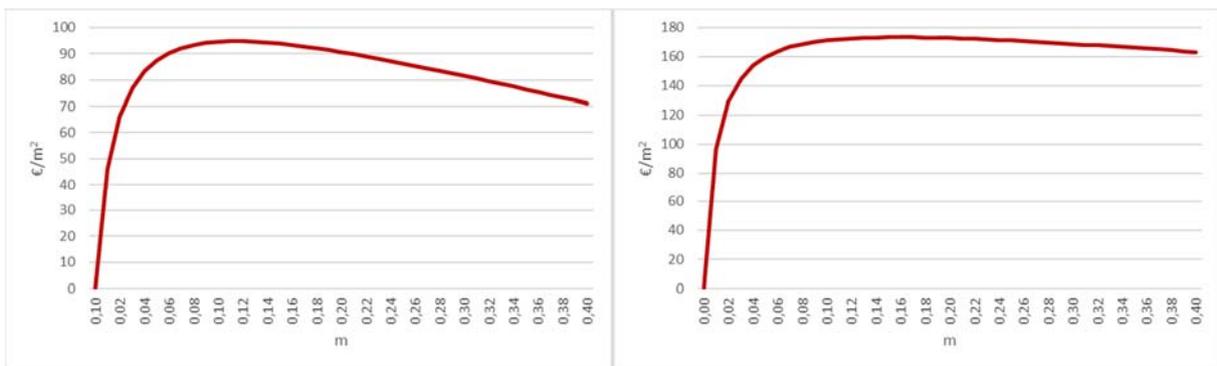


Figura 5: Ahorro total, considerando calefacción y refrigeración, en función del espesor de aislante, por unidad de superficie de intercambio, para todo el ciclo de vida para muros (izq.) y cubiertas (dcha.).



Se obtiene para el Caso 2, durante todo el ciclo de vida, que, para los muros, el espesor de aislante óptimo para calefacción es de 0,104 m y se consigue un ahorro total de calefacción de 79,71 €/m²; y que, para las cubiertas, el espesor de aislante óptimo para calefacción es de 0,145 m y se consigue un ahorro total de calefacción de 147,62 €/m². Mientras que se

obtiene para el Caso 3, durante todo el ciclo de vida, que, para los muros, el espesor de aislante óptimo para calefacción y refrigeración es de 0,113 m y se consigue un ahorro total de calefacción y refrigeración de 94,73 €/m²; y que, para las cubiertas, el espesor de aislante óptimo para calefacción y refrigeración es de 0,157 m y se consigue un ahorro total de calefacción y refrigeración de 173,30 €/m².

En la Tabla 5 se muestran las transmitancias térmicas, los costes del aislante, los ahorros totales energéticos anuales y los periodos de retorno, tanto para muros como para cubiertas, atendiendo a los dos criterios de optimización empleados, Caso 2 y Caso 3, respecto a no emplear aislante.

Tabla 5: Transmitancia térmica, coste del aislante por unidad de superficie de intercambio, ahorro total energético anual por unidad de superficie de intercambio y periodo de retorno, tanto para muros como para cubiertas, para el Caso 2 y el Caso 3, respecto a no emplear aislante.

Caso	Elemento	Transmitancia térmica (W/m ² ·K)	Coste del aislante (€/m ²)	Ahorro total energético anual (€/m ² ·año)	Periodo de retorno (años)
Caso 2	Muros	0,29	12,36	7,27	1,70
	Cubiertas	0,22	10,28	7,56	1,36
Caso 3	Muros	0,27	13,47	8,54	1,58
	Cubiertas	0,20	11,14	8,85	1,26

El Caso 1, el Caso 2 y el Caso 3 cumplen la Reglamentación Térmica de la OGUC (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2006a). Respecto a las transmitancias térmicas máximas exigidas, Caso 1, en el Caso 2 se logra reducir la transmitancia térmica de los muros un 84,74% y la de las cubiertas un 53,19%; y en el Caso 3 se logra reducir la transmitancia térmica de los muros un 85,79% y la de las cubiertas un 57,45%. En todos los casos se emplean ventanas con doble vidriado hermético y el porcentaje de superficie de ventanas respecto a paramentos verticales de la envolvente térmica es del 21,97%, inferior al 60% exigido para el tipo de vidrio empleado y el valor de la transmitancia térmica de las ventanas.

En la Tabla 6 se presentan los ahorros anuales logrados en energía final, energía primaria y emisiones de CO₂, así como los económicos correspondientes para los servicios tanto de calefacción como de refrigeración, atendiendo a los dos criterios de optimización empleados, Caso 2 y Caso 3, respecto al edificio de referencia, Caso 1.

Tabla 6: Ahorro anual en energía final, energía primaria y emisiones de CO₂, así como ahorro anual económico, todos ellos por unidad de superficie habitable, para los servicios de calefacción y de refrigeración, para el Caso 2 y el Caso 3, respecto al Caso 1.

Caso	Servicio	Ahorro EF (kWh _{EF} /m ² ·año)	Ahorro EP (kWh _{EP} /m ² ·año)	Ahorro EM (kg CO ₂ /m ² ·año)	Ahorro económico (€/m ² ·año)
Caso 2	Calefacción	90,31	99,35	18,24	10,84
	Refrigeración	14,65	27,83	4,50	1,76
Caso 3	Calefacción	92,07	101,28	18,60	11,05
	Refrigeración	14,93	28,37	4,58	1,79

5. Conclusiones

Las soluciones obtenidas permiten cumplir la Reglamentación Térmica de la OGUC (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2006a) y suponen grandes ahorros tanto a nivel energético y medioambiental como a nivel económico. Se consigue reducir la transmitancia térmica máxima permitida de muros entre un 84,74% y un 85,79%, y la de cubiertas entre un 53,19% y un 57,45%. Con una inversión en aislante que se recupera en menos de 2 años, se logran unos ahorros anuales por unidad de superficie habitable, todos ellos respecto a emplear las transmitancias térmicas máximas permitidas, de entre 104,96 kWh_{EF}/m²·año y 107,00 kWh_{EF}/m²·año; entre 127,18 kWh_{EP}/m²·año y 129,65 kWh_{EP}/m²·año; entre 22,74 kg CO₂/m²·año y 23,18 kg CO₂/m²·año; y entre 12,60 €/m²·año y 12,84 €/m²·año.

Además, el estudio realizado es altamente replicable en otras zonas climáticas chilenas y en líneas de trabajo futuras se abordarán posibles cambios de la Reglamentación Térmica de la OGUC (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2006a) actualmente vigente, con las pertinentes modificaciones y adaptaciones de la metodología empleada, y se propondrán políticas de rehabilitación energética sostenibles para el sector residencial.

Referencias

- ASHRAE (2020). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: <https://www.ashrae.org/>.
- Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (2020). Censos de población y vivienda [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: <https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda>.
- Instituto Nacional de Normalización de Chile (2007). Norma Chilena NCh 853 de 2007: Acondicionamiento térmico – Envoltorio térmico de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: <http://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/nch853>.
- Kurekci, N. A. (2016). Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Turkey's provincial centers. *Energy and Buildings*, 118, 197–213, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.004>.
- López-Ochoa, L. M., Las-Heras-Casas, J., López-González, L. M., & García-Lozano, C. (2020). Energy Renovation of Residential Buildings in Cold Mediterranean Zones Using Optimized Thermal Envelope Insulation Thicknesses: The Case of Spain. *Sustainability*, 12, 2287, <https://doi.org/10.3390/su12062287>.
- López-Ochoa, L. M., Verichev, K., Las-Heras-Casas J., & Carpio M. (2019). Solar domestic hot water regulation in the Latin American residential sector with the implementation of the Energy Performance of Buildings Directive: The case of Chile. *Energy*, 188, 115985, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115985>.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (2006a). Decreto N° 192, fecha de publicación 4 de enero 2006, por el que el Ministerio de Vivienda y Urbanismo modifica el Decreto N° 47, de 1992, Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=245882>.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (2006b). Manual de Aplicación de la Reglamentación Térmica [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: http://admminvuv57.minvu.cl/opensite_20070417155724.aspx.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (2009). Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: <https://www.minvu.cl/elementos-tecnicos/decretos/d-s-n47-1992-ordenanza-general-de-urbanismo-y-construcciones-actualizada-a-22-febrero-2018/>.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (2018). Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile (Tomo II Energía) [consultado en 30.04.2020]. Disponible en:

<https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2018/03/EST%C3%81NDARES-DE-CONSTRUCCI%C3%93N-SUSTENTABLE-PARA-VIVIENDAS-DE-CHILE-TOMO-II-ENERGIA.pdf>.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (2020). Calificación Energética de Viviendas [consultado en 30.04.2020]. Disponible en: <http://www.calificacionenergetica.cl/>.

Yuan, J., Farnham, C., & Emura, K. (2017). Optimal combination of thermal resistance of insulation materials and primary fuel sources for six climate zones of Japan. *Energy and Buildings*, 153, 403–411, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.039>.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

