

Artículo
Recibido 23-09-2014
Aceptado 28-10-2014

Evaluación de mejoramiento de muros mediante simulación energética y análisis de LCC para viviendas de construcción frecuente en Chile

Evaluation of wall retrofits in frequently-built housing in Chile using energy simulation and life cycle cost analysis

JORGE MUÑOZ FIERRO, Universidad del Bío Bío,
Concepción, Chile \
Jommunoz@gmail.com

JAIME SOTO MUÑOZ, Universidad del Bío Bío,
Concepción, Chile \
jsotom@ubiobio.cl

Palabras clave:

Mejoramientos de muros, eficiencia energética, viviendas albañilería y madera, análisis de costos de ciclo de vida (LCCA).

Keywords:

wall retrofits, energy efficiency, timber and masonry housing, life cycle cost analysis (LCCA)

RESUMEN

El elevado consumo de energía a nivel residencial, provocado en parte por la escasa preocupación que existía hasta hace unos años por generar viviendas eficientes, es hoy en día un asunto cada vez más importante. El presente estudio recoge dicho problema, a través de una evaluación enfocada a determinar las ventajas que tiene la ubicación de la aislación térmica en los muros de una vivienda, para lograr una reducción de los costos en calefacción. Con ese fin, se realiza una selección de sistemas de mejoramiento aplicables a tres casos de estudio. En ellos, se caracterizan los aspectos más relevantes, siendo posteriormente simulados para un análisis de demanda y transmitancia térmica. Además, las soluciones se evalúan bajo el supuesto de ser aplicables a una alternativa existente en la actualidad, es decir, la asignación de un subsidio de mejoramiento, disponible en Chile. Las mismas ventajas son medidas a través de técnicas de análisis económico para sistemas constructivos, basadas en la metodología ASTM, cuyo objetivo es verificar si la mayor inversión inicial en un determinado sistema, se compensa o no por medio de la disminución de los costos futuros, identificando asimismo los aspectos más determinantes en ese proceso.

ABSTRACT

High residential energy consumption caused in part by lack of concern up until recently about the construction of efficient housing is an increasingly important issue nowadays. This study addresses the aforementioned problem by evaluating the advantages of the location of thermal insulation in housing walls, in order to reduce heating costs. To this end, retrofit systems were selected for three case studies, in which the most relevant aspects were characterized and subsequently simulated to carry out analyses of demand and thermal transmittance. Furthermore, solutions were evaluated under the assumption that they could be implemented using one of the currently existing alternatives, i.e. through housing improvement subsidies available in Chile. The benefits were measured using economic analysis techniques for building systems based on ASTM methodology. This evaluation was performed in order to verify whether a higher initial investment in a given system is compensated by the reduction of future costs, in this way identifying the most influential factors in this process.

1 INTRODUCCION

Uno de los principales problemas que sufren actualmente las viviendas del país es la eficiencia de los sistemas de calefacción en invierno y de enfriamiento en verano, debido al considerable gasto asociado a estos por parte de la población. Del consumo total de energía en una vivienda, en promedio, el 56% se destina solamente a calefacción (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2010). Además, estudios muestran que mantener una vivienda que pueda aislar correctamente el frío y el calor constituye un aspecto importante para la población (IPSOS, 2012). En la actualidad, la reglamentación térmica permite mejorar las condiciones de viviendas nuevas, por medio de la exigencia de un estándar base, pero se estima que alrededor de un 86% de las viviendas se construyeron antes de su puesta en marcha (CDT, 2010). De lo anterior, se desprende que existe una cantidad de viviendas importante en el país que no cuenta con las condiciones mínimas establecidas.

Este alto porcentaje de casos sin óptimo desempeño energético ha impulsado políticas por parte del Estado de Chile, que ha dispuesto subsidios de mejoramiento para viviendas, en particular para sectores de ingresos medios y bajos de la población. Estos recursos se orientan tanto a dar cumplimiento a la reglamentación, como a disminuir la demanda de energía y proteger el presupuesto de los hogares del país. Para ello, se estableció el D.S. N° 255 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2010), el cual se encarga de reglamentar el Programa de Protección del Patrimonio Familiar y aborda las distintas alternativas y requisitos que deben cumplirse para que las familias puedan hacerse acreedoras de los subsidios. Por lo demás, existen diferentes clases de subsidios dentro del D.S. N°255, siendo el Título II el que aborda mejoramientos a viviendas existentes. Dentro de éste, pueden mencionarse proyectos relacionados con seguridad, habitabilidad, mantención de la vivienda y obras en innovaciones de eficiencia energética. Actualmente, también se considera para la mejora de las viviendas, el Título I de dicho decreto, asociado a equipamiento comunitario y mejoramiento del entorno, ya que en casos de mejoramiento exterior de edificaciones colectivas se logra el mismo propósito de la indicación.

Ahora bien, los planes de mejoramiento de viviendas implementados no han resuelto con claridad qué tan efectivos son desde el punto de la inversión y de los ahorros que generan para el ciclo de vida. Como tampoco si el monto entregado por parte del subsidio estatal es suficiente para realizar mejoras significativas a la envolvente de muros, o hasta dónde es posible recuperar la inversión realizada. Dentro de las alternativas para mejorar la resistencia térmica de la envolvente de

muros, no se ha evidenciado las ventajas o desventajas de acuerdo a su ubicación: interior o exterior de la edificación. En relación a los costos, sistemas aplicados por el exterior son asociados a mayores inversiones iniciales, no obstante, permiten también lograr un mejor comportamiento térmico, por lo que debe realizarse un estudio acucioso de ellos (Kolaitis *et al.*, 2013). Esto ocurre ya que la incorporación de masa térmica a un edificio permite mejorar el confort de los ocupantes, reduciendo la exigencia de los sistemas mecánicos (Andjelković *et al.*, 2012). Respecto a las medidas que conducen al ahorro energético, algunos autores manifiestan la importancia de las características de ocupación sobre la energía utilizada, señalando como parámetros más influyentes las características térmicas del edificio, el tipo de construcción, el comportamiento del ocupante y el clima (Guerra Santin, Itard y Visscher, 2009).

Por otra parte, la reglamentación térmica nacional no incorpora variables referentes al diseño eficiente de los sistemas constructivos, como es en este caso el concepto de la inercia térmica (Pavez, 2013). Ello hace necesario estudiar en detalle los efectos dados por situar el mejoramiento en el interior o exterior de la envolvente de muros, para determinar su conveniencia, según sea el caso.

2 DESARROLLO

El estudio considera como alcance el análisis de viviendas de la provincia de Concepción, Chile, que tienen una tipología frecuente de construcción. Además, tiene en cuenta la caracterización de aquellas edificaciones residenciales unifamiliares que cumplen con los requisitos establecidos en la disposición pública antes mencionada, D.S. N° 255 del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU, 2010), específicamente en el Título II sobre proyectos de mejoramiento para viviendas y cuyas comunas se encuentran en el tramo 2. Es decir, viviendas cuyo valor de tasación fiscal no supera los USD 26.650 y cuyas familias no posean más de 13.484 puntos en la ficha de caracterización social. La definición de dicho tramo se realiza para configurar los supuestos del análisis económico, utilizándose como punto de comparación el monto máximo del subsidio entregado para el mismo. Por lo demás, las comunas que conforman dicho tramo, pertenecen a la misma zona térmica, y deben cumplir los mismos requisitos de transmitancia para sus elementos de la envolvente.

Requisitos	Fundamentos
Unidad de funcionamiento complejo	Cada vivienda posee factores diversos como: <ul style="list-style-type: none"> - Confort térmico - Condiciones de uso - Tipo de ocupantes - Tipo de calefacción existente
Contexto natural y multitud de métodos	Se estudia los casos analizando factores como: <ul style="list-style-type: none"> - Consumo energético - Tipología constructiva - Entorno geográfico - Horarios de ocupación y calefacción
Contemporáneo	Se consideran aspectos actuales como: <ul style="list-style-type: none"> - Viviendas en uso - Programas de mejoramientos - Costos de mejoramientos

Tabla.1 Fundamentos casos de estudio.

3 SELECCIÓN DE CASOS

Para la ejecución de la investigación se seleccionaron casos, bajo los criterios planteados por Johansson (2003), es decir, cada vivienda se caracterizó como una unidad de funcionamiento complejo, considerando su contexto natural en la realidad actual y contemporánea (ver Tabla 1). Para el desarrollo se realizó un estudio inicial de 50 viviendas seleccionadas intencionalmente, revisando la caracterización general de las viviendas, hábitos y consumos de energía. Posteriormente y de la misma forma, se seleccionó tres casos como objetos de estudio, los cuales cumplen con los requisitos necesarios para postular a los subsidios estatales, dentro de los cuales el principal consiste en que las viviendas no excedan un monto indicado de acuerdo a la tasación fiscal del inmueble (información corroborada a partir de registros del Servicio de Impuestos Internos (SII) del país).

Es posible señalar, tal como lo indica el D.S. N°255 artículo 6 bis, que los casos cuyos proyectos se encuentran con certificado de recepción municipal anterior al 4 de enero de 2007 y que consideran un acondicionamiento térmico para cumplir con lo establecido en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, pueden duplicar el monto total del subsidio en caso de requerirlo. Lo anterior se aplica para las viviendas de los casos 1 y 2; en tanto que el caso 3 sólo se evalúa en torno al monto base del beneficio estatal disponible.

La selección de viviendas se realiza de acuerdo a su materialidad, considerando que ciertos estudios identifican a la albañilería (48,8%) y la tabiquería de madera (26,5%) como las principales fuentes de edificación (CDT, 2010). Para ello se caracterizan las viviendas, distinguen tipologías constructivas, antecedentes generales de construcción y sistemas de calefacción presentes (ver tabla 2). Además, se modela cada vivienda, después de un levantamiento de datos en terreno y especificaciones de planos (imagen 1, 2 y 3).

Requisitos		Fundamentos	
Comuna	San Pedro de la Paz	Talcahuano	Tomé
Sector	Villa San Pedro	Pobl. Libertad	Dichato
Tipo de vivienda	Pareada	Pareada	Pareada
Año de construcción	1989	1983	2011
Última rehabilitación importante	2006	2003	-
Superficie	127,3 m ²	59,71 m ²	51,24 m ²
Materialidad muros nivel 1	Albañilería	Albañilería	Albañilería
Materialidad muros nivel 2	Tabiq. madera	-	Tabiq. madera
Materialidad muros nivel 3	Tabiq. madera	-	-
Habitantes regulares	4	5	3
Meses de uso calefacción	5	12	5
Sistemas de calefacción utilizados	Estufa a leña Estufa a gas Calefactor eléctrico	Estufa a leña Estufa a gas -	- Estufa a gas -

Tabla.2 Presentación casos de estudio.

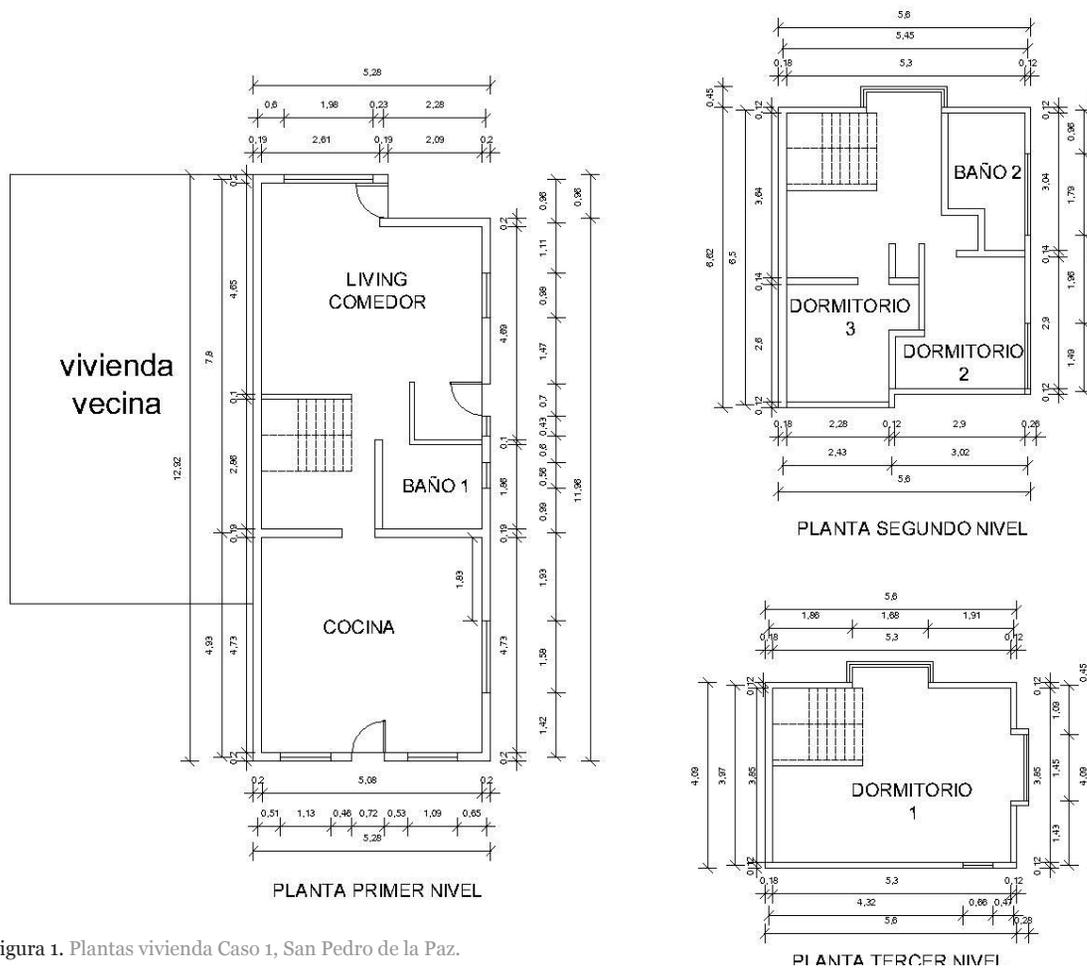


Figura 1. Plantas vivienda Caso 1, San Pedro de la Paz.

3.1 CASO 1

Esta edificación da cuenta de un proceso de autoconstrucción no regularizado ante los organismos pertinentes. La situación se repite dentro de los 50 casos iniciales, por lo que se considera valioso incluirla dentro del análisis particular. La vivienda en cuestión se caracteriza por poseer un régimen de calefacción durante los meses de abril a agosto, en los cuales existe ocupación permanente (ver Tabla 3) y la calefacción se mantiene encendida regularmente en el horario comprendido desde las 9:00 hasta las 22:00 horas, para los sectores del primer piso. En lo que respecta a dormitorios en el segundo nivel, los habitantes disponen de una calefacción adicional solamente alrededor de una hora antes de proceder a dormir (ver Tabla 4).



Figura 4. Vivienda Caso 1

		N° de personas por hora en cada recinto											
RECINTO	DÍAS	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	00:00	02:00	04:00
		a 07:59	a 09:59	a 11:59	a 13:59	a 15:59	a 17:59	a 19:59	a 21:59	a 23:59	a 01:59	a 03:59	a 05:59
LIVING COMEDOR	L. a V.		1	1	1				2	2			
	Sábado			2	2	2	2		2	2			
	Dom. o Festivo												
COCINA	L. a V.	2			2			4	4				
	Sábado		3	3	3			4	4				
	Dom. o Festivo		3		1			1		3			
BAÑO 1	L. a V.												
	Sábado		1	1						1			
	Dom. o Festivo		1						1	1			
BAÑO 2	L. a V.	1							1				
	Sábado								1				
	Dom. o Festivo												
DORM. 1	L. a V.	1							2	2	2	2	2
	Sábado	2	1						2	2	2		2
	Dom. o Festivo	2								2	2	2	2
DORM. 2	L. a V.	1							1	1	1	1	1
	Sábado	1	1						1	1	1	1	1
	Dom. o Festivo	1								1	1	1	1
DORMI. 3	L. a V.	1	1	1						1	1	1	
	Sábado	1	1	1						1	1	1	1
	Dom. o Festivo	1	1	1						1	1	1	1

Tabla.3 Horario de ocupación Caso 1

		Nº1 indica uso de calefacción en recinto											
RECINTO	DÍAS	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	00:00	02:00	04:00
		a 07:59	a 09:59	a 11:59	a 13:59	a 15:59	a 17:59	a 19:59	a 21:59	a 23:59	a 01:59	a 03:59	a 05:59
LIVING COMEDOR	L. a V.		1	1	1	1	1	1	1				
	Sábado		1	1	1	1	1	1	1				
	Dom. o Festivo		1	1	1	1	1	1	1				
COCINA	L. a V.	1	1	1	1	1	1	1	1				
	Sábado		1	1	1	1	1	1	1				
	Dom. o Festivo		1	1	1	1	1	1	1				
BAÑO 1	L. a V.	1	1		1				1	1			
	Sábado		1	1	1				1	1			
	Dom. o Festivo												
BAÑO 2	L. a V.												
	Sábado												
	Dom. o Festivo												
DORM. 1	L. a V.	1							1				
	Sábado								1				
	Dom. o Festivo								1	1			
DORM. 2	L. a V.	1							1				
	Sábado								1				
	Dom. o Festivo									1			
DORMI. 3	L. a V.								1				
	Sábado								1				
	Dom. o Festivo									1			

Tabla.3 Horario de ocupación Caso 1

3.2 CASO 2

La vivienda posee un régimen de calefacción durante todo el año, en los horarios que se indican a continuación (ver Tabla 5), ello debido a que la principal fuente de calefacción usada, corresponde a una cocina a leña la cual durante los meses fríos de invierno se mantiene encendida en forma prolongada (ver Tabla 6).

Adicionalmente, es importante indicar que la vivienda se mantiene ocupada durante todo el día ya que, algunos de sus ocupantes constituyen niños y adultos mayores. En el mismo sentido, tal como puede apreciarse en la Tabla 5, los sectores de living comedor y cocina presentan la mayor ocupación durante todo el día, además la vivienda presenta una densidad de personas bastante elevada, no existiendo grandes diferencias entre lo que sucede de lunes a viernes y durante el fin de semana.



Figura 5. Vivienda Caso 2

		N° de personas por hora en cada recinto											
RECINTO	DÍAS	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	00:00	02:00	04:00
		a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		07:59	09:59	11:59	13:59	15:59	17:59	19:59	21:59	23:59	01:59	03:59	05:59
LIVING COMEDOR	L. a V.	2	2	2	3	3	3	3	4	5			
	Sábado	1	3	3	3	3	3	3	4	5			
	Dom. o Festivo		5	5	5	5	5	5	5	4			
COCINA	L. a V.	2	2	2	3	2	3	3	3	3			
	Sábado	2	2	2	3	3	3	3	3	3			
	Dom. o Festivo		3	3	3	3	3	3	3	3			
BAÑO 1	L. a V.	2	2		3			1	1	5			
	Sábado	1	3		3			1	1	5			
	Dom. o Festivo		5		3			1	1	5			
DORM. 1	L. a V.	2								1	2	2	2
	Sábado	2								1	2	2	2
	Dom. o Festivo	2								1	2	2	2
DORM. 2	L. a V.	1									1	1	1
	Sábado	1									1	1	1
	Dom. o Festivo	1									1	1	1
DORM. 3	L. a V.	1									2	2	2
	Sábado	1									2	2	2
	Dom. o Festivo	2									2	2	2

Tabla.5 Horario de ocupación Caso 2

		N°1 indica uso de calefacción en recinto											
RECINTO	DÍAS	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	00:00	02:00	04:00
		a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		07:59	09:59	11:59	13:59	15:59	17:59	19:59	21:59	23:59	01:59	03:59	05:59
LIVING COMEDOR	L. a V.			1	1	1	1	1	1				
	Sábado			1	1	1	1	1	1				
	Dom. o Festivo			1	1	1	1	1	1				
COCINA	L. a V.			1	1	1	1	1	1				
	Sábado			1	1	1	1	1	1				
	Dom. o Festivo			1	1	1	1	1	1				
BAÑO 1	L. a V.												
	Sábado												
	Dom. o Festivo												
DORM. 1	L. a V.							1	1				
	Sábado							1	1				
	Dom. o Festivo							1	1				
DORM. 2	L. a V.			1	1	1	1	1	1				
	Sábado			1	1	1	1	1	1				
	Dom. o Festivo			1	1	1	1	1	1				
DORM. 3	L. a V.			1	1	1		1	1				
	Sábado			1	1	1	1	1	1				
	Dom. o Festivo			1	1	1	1	1	1				

Tabla.6 Horario de calefacción Caso 2

3.3 CASO 3

La vivienda presenta como característica un régimen de calefacción bajo, ya que ésta solo se mantiene encendida, en periodos de tiempo comprendidos entre las 7:00 y 11:00 de la mañana y, posteriormente, entre 18:00 y 22:00 horas. Asimismo, sólo se hace uso de ella en los sectores de living comedor (ver Tabla 8). En cuanto al régimen de ocupación, resulta ser bastante ocasional, de lunes a viernes, siendo principalmente habitada por sus ocupantes en la noche después de las 21:00 horas. En cuanto a los fines de semana, la condición cambia, existiendo una mayor permanencia de sus ocupantes, lo que se refleja en los sectores de living comedor y cocina, los cuales de lunes a viernes prácticamente permanecen desocupados durante el día (ver Tabla 7). La razón del comportamiento antes mencionado puede deducirse de la cantidad y tipo de actividad que desarrollan sus ocupantes.v



Figura 6. Vivienda Caso 3

		N° de personas por hora en cada recinto											
RECINTO	DÍAS	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	00:00	02:00	04:00
		a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		07:59	09:59	11:59	13:59	15:59	17:59	19:59	21:59	23:59	01:59	03:59	05:59
LIVING COMEDOR	L. a V.	1							1	3	3		
	Sábado	3		3	3			3					
	Dom. o Festivo		3	3	3	3	3		3	3	3		
COCINA	L. a V.	1											
	Sábado		1		1	1							
	Dom. o Festivo		1		1	1							
BAÑO 1	L. a V.	3		2		2	2		3				
	Sábado	3	1	1		1			3				
	Dom. o Festivo	3	1	1		1			3				
DORM. 1	L. a V.	2				2	2						
	Sábado	2				2	2				2	2	2
	Dom. o Festivo	2									2	2	2
DORM. 2	L. a V.	1									2	2	2
	Sábado	1	1	1							1	1	1
	Dom. o Festivo	1	1	1							1	1	1

Tabla.7 Horario de ocupación Caso 3.

		N°1 indica uso de calefacción en recinto											
RECINTO	DÍAS	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	00:00	02:00	04:00
		a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		07:59	09:59	11:59	13:59	15:59	17:59	19:59	21:59	23:59	01:59	03:59	05:59
LIVING COMEDOR	L. a V.	1	1					1	1				
	Sábado	1	1	1				1	1				
	Dom. o Festivo	1	1	1				1	1				
COCINA	L. a V.												
	Sábado												
	Dom. o Festivo												
BAÑO 1	L. a V.												
	Sábado												
	Dom. o Festivo												
DORM. 1	L. a V.												
	Sábado												
	Dom. o Festivo												
DORM. 2	L. a V.												
	Sábado												
	Dom. o Festivo												

Tabla.8 Horario de calefacción Caso 3.

4 SELECCIÓN DE SISTEMAS DE MEJORAMIENTO TÉRMICO A EVALUAR

Tras observar los datos sobre horarios de calefacción y ocupación, se aprecian dos aspectos importantes. El primero está dado por la estrecha relación existente entre dichas variables, ya que a mayor ocupación, el nivel de calefacción también aumenta. No obstante, es visible además que la calefacción resulta ser bastante sectorizada, abarcando principalmente los sectores de living-comedor y cocina. Lo anterior permite inferir que los dormitorios están sometidos a condiciones más bajas de temperatura, al menos para los casos 1 y 3. Por consiguiente, implementar mejoras en estos sectores resultaría un aporte importante para lograr la condición de confort en las viviendas. tipo de actividad que desarrollan sus ocupantes.v

La selección de los sistemas de mejoramiento se realizó revisando el listado oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico (MINVU, 2014). Sin embargo, previamente se definen aquellas más óptimas. En el primer paso, se identifican las soluciones constructivas para muros de albañilería, debido a que el total de los casos está compuesto principalmente por este sistema. Luego, de estas últimas se descartan aquellas eliminadas o que no se encuentran vigentes. Además de las soluciones para albañilería, se eliminan aquellas que no son utilizables en la zona por su elevada transmitancia térmica. De esta forma, se establecen soluciones genéricas para someter a evaluación (ver Tabla 9).

1. Sistema EIFS:
Aislación de poliestireno expandido adherida mediante base cementicia al sustrato, y que por el exterior entrega terminación de mortero sobre malla y un revestimiento polimérico.

Ítem	Descripción	Ubicación	U [W/m²K]	Precio/m2 [USD\$]
S1	Sistema EIFS ¹ 30 [mm] de espesor	exterior	0,84	\$ 33,20
S2	Sistema EIFS ¹ 50 [mm] de espesor	exterior	0,6	\$ 35,00
S3	Poliestireno 10 [mm] + yeso cartón 10 [mm]	interior	1,51	\$ 18,10
S4	Poliuretano 10 [mm] densidad 25 [kg/m³] + yeso cartón 10 [mm]	interior	1,26	\$ 27,20
S5	Poliestireno 10 [mm] + fibrocemento 6 [mm]	interior	1,54	\$ 19,30
S6	Poliuretano 10 [mm] densidad 25 [kg/m³] + Fibrocemento 6 [mm]	interior	1,28	\$ 33,90
S7	Poliestireno 30 [mm] + yeso cartón 10 [mm]	interior	0,89	\$ 23,20
S8	Poliuretano 30 [mm] densidad 25 [kg/m³] + yeso cartón 10 [mm]	interior	0,65	\$ 30,30
S9	Poliestireno 30 [mm] + Fibrocemento 6 [mm]	interior	0,9	\$ 24,80
S10	Poliuretano 30 [mm] densidad 25 [kg/m³] + Fibrocemento 6 [mm]	interior	0,66	\$ 37,10
S11	Estuco térmico 25 [mm] densidad 969 [kg/m³]	interior-exterior	1,68	\$ 26,20

Tabla.9 Listado de soluciones evaluadas..

Como se observa, existen soluciones que se basan en los mismos sistemas, los cuales básicamente presentan diferencias en los espesores del material aislante; no obstante, dado que la inversión inicial cambia, se optó por considerar varias alternativas de mejoramiento. Además, se aprecia una mayor cantidad de soluciones en el interior, lo que viene dado por la mayor combinación entre revestimientos y materiales aislantes dentro del listado.

Proceso de simulación

Hoy se dispone de variadas herramientas de simulación térmica validadas y reconocidas, entre ellas: BLAST, BSim, DeST, DOE-2.1E, ECOTECT, Ener-Win, Energy Express, Energy-10, EnergyPlus, ESP-r, PowerDomus, SUNREL, Tas, HAP, HEED, TRACE y TRNSYS, eQUEST, IDA ICE, IES/VES (Crawley *et al.*, 2008, citado en Hatt, 2012).

Para el estudio de casos y sistemas incorporados se utiliza el *software* de simulación energética DesignBuilder versión 3.4. Este incorpora Energy Plus, herramienta de cálculo empleada por ingenieros, arquitectos e investigadores para modelar el uso de la energía en los edificios (U.S. Department Of Energy, 2014). Dentro de las ventajas que proporciona el programa, destaca su

capacidad de modelar en 3D, de extraer digitalmente planos desde el formato AutoCAD, de entregar cálculos térmicos rápidos y de poseer una interfaz gráfica fácil de utilizar. Asimismo, caracterizaciones respecto a las diferentes herramientas existentes en el mercado de la simulación energética (García *et al.*, 2014), la clasifican dentro de las más completas, ya que permite incorporar a las modelaciones detalles como descripción de equipos, archivos climáticos, horarios, comprobación de normativas, etc. En este estudio, tales detalles provienen de un trabajo de campo realizado en las tres viviendas, en las que se levantó información respecto a la materialidad, condiciones geográficas, horarios de calefacción y ocupación, además de los tipos de combustibles utilizados para ello.

El proceso de simulación contempla el uso de una temperatura mínima de confort de 20° durante el día y 18° en la noche. Además, se consideran dos simulaciones base. En la primera se toman en cuenta los periodos de tiempo en que se enciende la calefacción, de acuerdo a lo informado por los usuarios (consumo). En tanto que la segunda implica mantener la condición de confort en todo momento (demanda). Los resultados obtenidos se observan en la Tabla 10.

Caso/Ubicación	Calefacción [kWh/m ²]	
	SIM-01	SIM-02
1/San Pedro de la Paz	35,4	130,5
2/Talcahuano	37,6	122,4
3/Dichato	8,66	111,06

Tabla.10 Demandas anuales calefacción [kWh/m²]
SIM-01 Demanda calefacción existente, SIM-02 Demanda anual requerida.

A modo de comparación, investigaciones previas (Bustamante *et al.*, 2009) determinan, para viviendas de similares características en Concepción, demandas de energía de 113 kWh/m². Otras investigaciones (García, Trebilcock y Soto, 2013) obtuvieron demandas anuales ubicadas entre los 50 y los 200 kWh/m². Lo anterior muestra que, si bien los resultados no son iguales, se aproximan bastante, o bien, se mantienen en rangos similares, considerando que cada vivienda posee características particulares que la vuelven única y originan variaciones en este sentido.

Análisis de las demandas base

Las simulaciones muestran demandas en calefacción y refrigeración durante los 12 meses del año, tanto para la condición de calefacción real como la requerida. Se observa que el periodo con mayor demanda en calefacción corresponde al mes de julio, en tanto que para refrigeración, a enero. Datos que resultan coherentes, puesto que estos son los meses donde se registran las extremas de temperaturas en invierno y verano, respectivamente. Además, se aprecia la gran diferencia entre la energía requerida en cada vivienda y la que en efecto se consume (ver Figura 7). En el Caso 1 el consumo de la vivienda representa solo un 27% de lo que en realidad requiere, en el Caso 2, en tanto, el consumo asciende al 49%, y, finalmente, el Caso 3 presenta la relación más baja, solo un 8%.

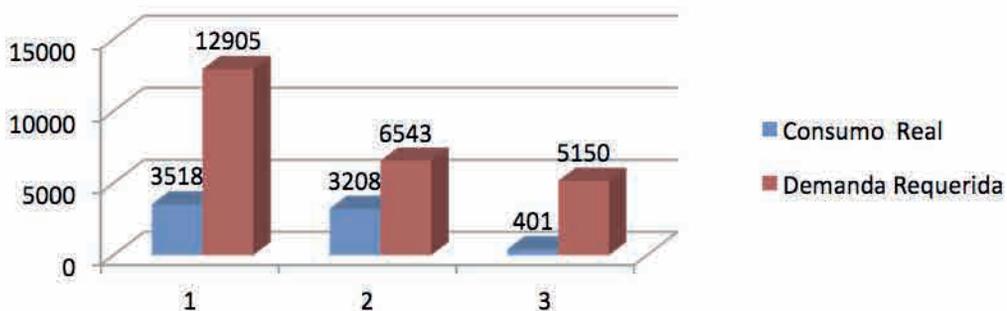


Figura.7 Consumo versus demanda en calefacción [kWh].

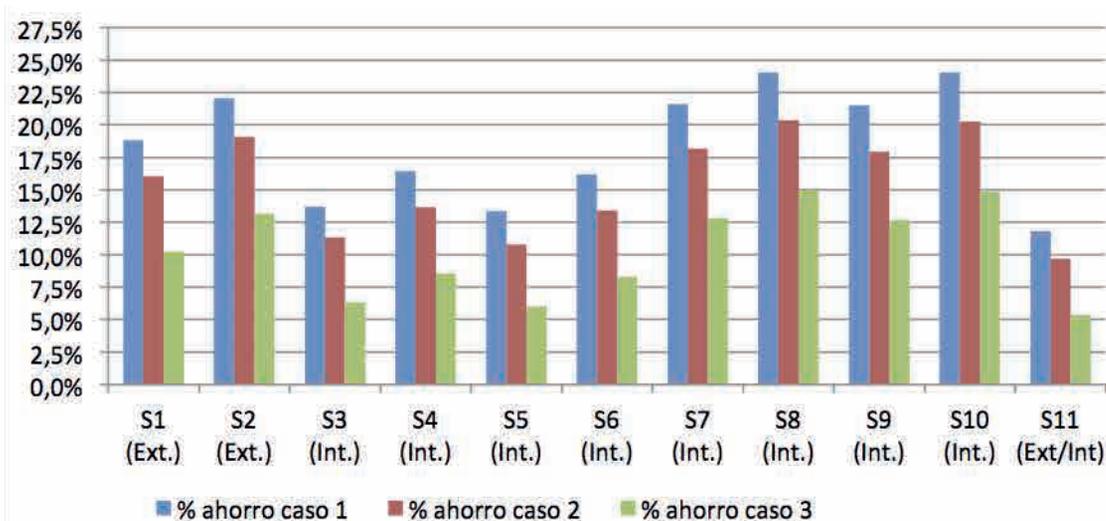


Figura.8 Ahorros/soluciones bajo régimen de calefacción real.

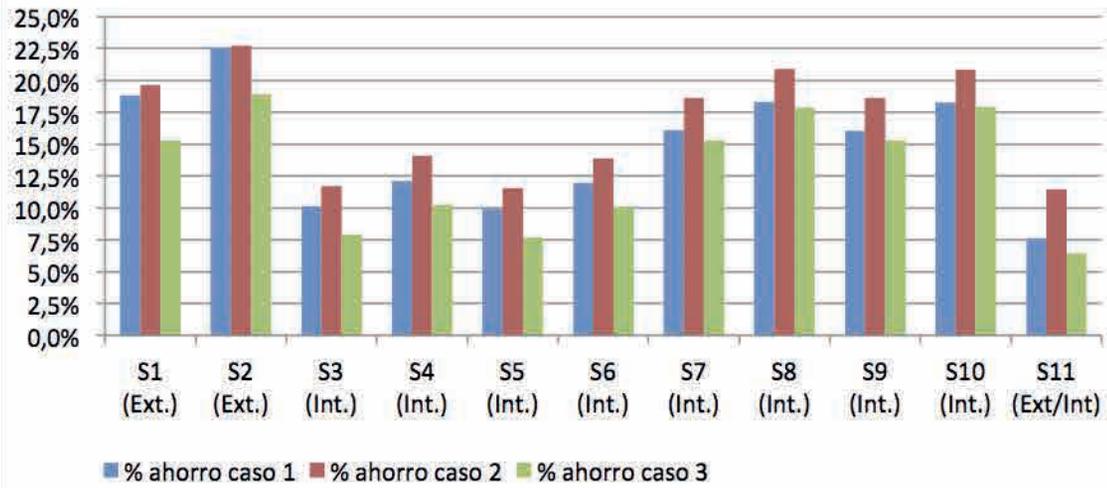


Figura.9 Ahorros/soluciones bajo régimen de calefacción requerida.

Como se observa en la Figura 8, el régimen de calefacción existente permite que las soluciones estudiadas otorguen ahorros en la demanda, los que varían de entre un 5,4% a un 24,1%, en el mejor de los casos. De igual forma, las soluciones con los mayores ahorros son aquellas incorporadas por el interior de la envolvente (poliuretano + yeso cartón).

Ahora bien, si se mantiene la calefacción permanente para lograr la condición de confort (Figura 9), los resultados cambian, puesto que el sistema EIFS (ver Figura 4) en 50 mm, permite obtener ahorros mayores en la demanda. Sin embargo, las diferencias con respecto a la mejor alternativa por el interior, se ubican entre el 1% y 4,2% en los tres casos.

La influencia que poseen estos porcentajes se aprecia en el análisis económico que se expone a continuación.

Análisis económico

El análisis costo ciclo de vida o LCC, por sus siglas en inglés, se realiza de acuerdo a la metodología planteada en la norma ASTM E917 (2013). Para llevarlo a cabo se definen una serie de supuestos sobre los cuales se rige el análisis. Se incluye el aumento de la tasación del bien inmueble al fin del ciclo de vida útil, considerando tasaciones comerciales de viviendas similares.

Para los diversos sistemas, el LCC está calculado teniendo en cuenta tanto el consumo real en calefacción como la demanda anual. A continuación, se detallan los supuestos definidos (Tabla 11) y se analizan los resultados obtenidos.

Tasa de descuento	6%
Ciclo de vida de estudio	25 años
Periodo del estudio	Anual
Escalamiento combustibles	Gas licuado: 13%
	Leña: 2%
	Electricidad: 5%
Inflación	No se considera
Valor de reventa	Sistemas por el interior: Aumento 15% de la inversión Sistemas por el exterior: Aumento 50% de la inversión

Tabla.1 Fundamentos casos de estudio.

Se consideró aquí que las mejoras serían gestionadas por alguna EGIS municipal, por ende, fueron utilizados porcentajes de utilidades y gastos generales acorde al máximo que aceptan dichas instituciones, es decir, 20 y 8%, respectivamente.

LCC régimen de calefacción real y requerido.

Existe una gran diferencia respecto al LCC en ambos regímenes de calefacción. Por una parte, al considerar la calefacción real, se aprecia, en los casos 1 y 3, que todas las soluciones concluyen en un costo mayor al finalizar el periodo de estudio. Esto evidencia la dificultad para recuperar la inversión inicial en su totalidad, tal como se aprecia en la Figura 10.

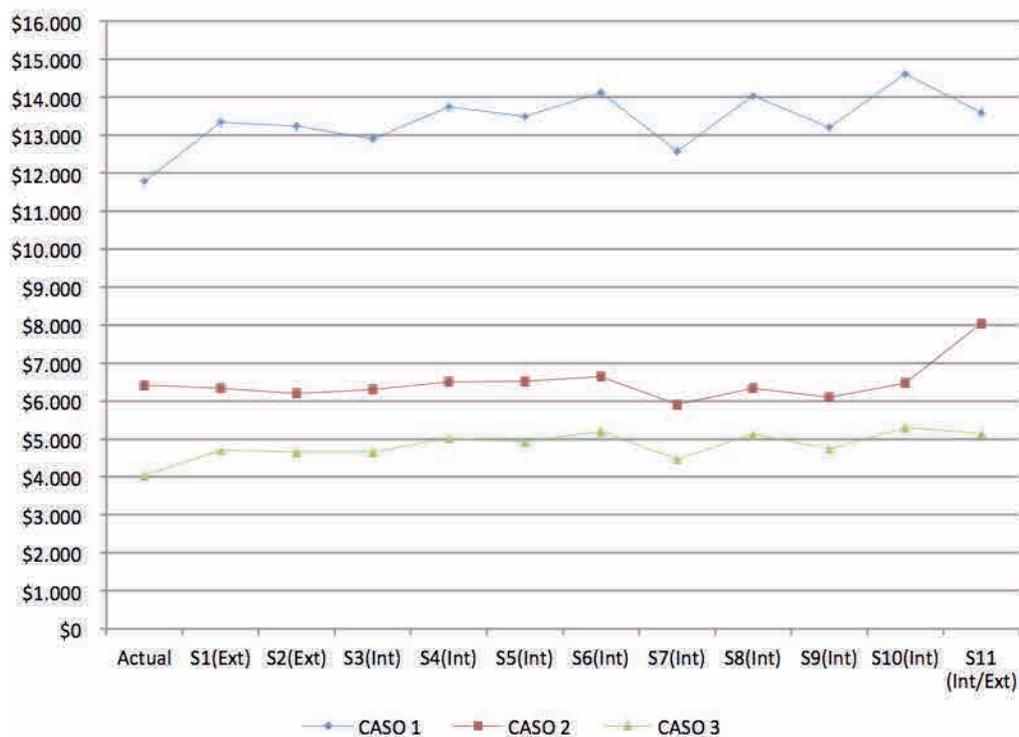


Figura.10 LCC Régimen de calefacción real.

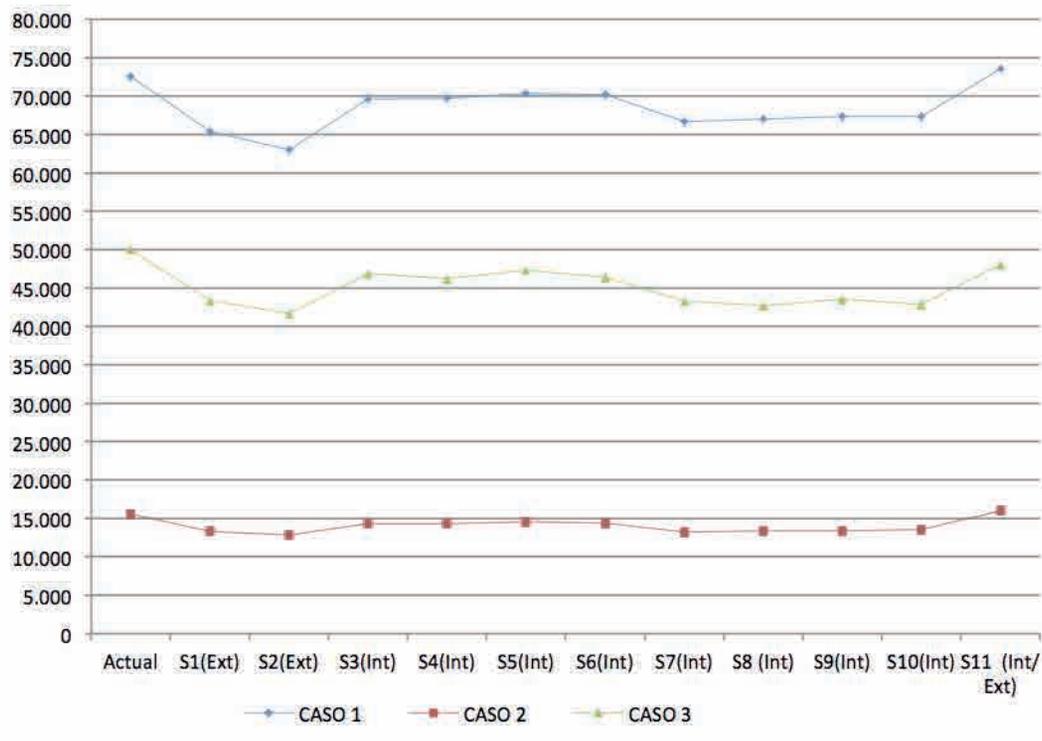


Figura.11 LCC Régimen de calefacción requerido.

Por otra parte, en el Caso 2, la mayor similitud entre los regímenes de calefacción, permite que se observen alternativas que reducen el LCC en ambos escenarios. No obstante, las soluciones son evaluadas considerando su aplicación a través de la obtención del subsidio de mejoramiento térmico, por lo cual la inversión inicial no es asumida por el beneficiario y su uso sirve solo como punto de comparación para establecer diferencias entre las respectivas soluciones.

Otro aspecto importante de analizar, es que ante el régimen de calefacción real, los mejoramientos por interior constituyen las alternativas más recomendadas. Mientras que considerando el régimen requerido, la mayoría de las soluciones permiten obtener costos más bajos que la situación actual (Figura 11), siendo la solución en base al sistema EIFS (S2 (Ext)) aquella que resulta más beneficiosa en todos los casos estudiados.

Se observa, además, una gran diferencia en el costo final para cada caso, lo que se explica en parte por el tipo de combustibles usados en cada vivienda, la superficie construida y el régimen de calefacción existente.

Ahora bien, es necesario determinar si la inversión inicial asociada a cada sistema es compatible con el monto atribuible a cada vivienda, lo cual se analiza a continuación.

Caso 1, San Pedro de la Paz.

La vivienda del Caso 1 fue construida antes del año 2007, lo que indica que puede optar a un monto máximo cercano a los USD \$4.640. Comparando el monto máximo del subsidio y el costo de implementación, se obtiene que el sistema EIFS sobrepasa el monto asignado (ver Figura 12), lo que descarta su aplicación, al menos en la vivienda completa. Sin embargo, resulta ser el sistema que brinda la mejor relación de costo beneficio, transcurrido el periodo estudiado.

Tal situación se produce debido a la extensa superficie de muros expuesta al exterior. Las demás medidas sí se ajustan al monto máximo del subsidio, lo que las convierte en alternativas viables.



Figura.12 Caso 1: Inversión inicial en sistemas versus LCC demanda.

Caso 2, Talcahuano.

La vivienda del Caso 2, construida en 1983, puede optar al subsidio por un monto máximo de USD \$4.640 al igual que la vivienda del caso 1.

Sin embargo, tal como exhibe la Figura 13, a diferencia del Caso 1, la totalidad de los sistemas de mejoramiento presentan un costo inferior al máximo atribuible por el subsidio, debido a que la vivienda en cuestión presenta una menor superficie construida.

Caso 3, Dichato.

La vivienda de Dichato fue entregada el año 2011, fecha posterior a la implementación de la reglamentación térmica, por lo cual el monto máximo al que puede optar es cercano a los USD \$2.380.



Figura.13 Caso 2: Inversión inicial en sistemas versus LCC demanda.



Figura.14 Caso 3: Inversión inicial en sistemas versus LCC demanda.

5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad se basa en el uso de las normas ASTM E1369 (2011) y E1946 (2012), las que entregan directrices para complementar el análisis económico LCC. Este procedimiento se realiza para medir el impacto en los resultados del proyecto (LCC soluciones), dado que ocurren cambios en los valores de entrada considerados, producto de la incertidumbre existente sobre ellos. La técnica utilizada comprende el uso de la simulación de Montecarlo a través del software @RISK versión 6.2. Se optó, además, por considerar solo el sistema con mayor inversión inicial en cada caso (EIFS en 50 [mm]), debido a que es el más influyente de todos, tanto en la inversión necesaria como en la reducción de los costos en calefacción.

En la figura 15, es posible apreciar el LCC correspondiente a los tres casos. En el Caso 1 existe alrededor de un 90% de probabilidad que el LCC se sitúe en un valor comprendido entre USD\$61.108 y USD\$69.084, lo cual evidencia la gran incidencia que genera una variación en los parámetros de entrada. En el Caso 2, dado el tipo de combustibles usados, el 90% de probabilidad se encuentra en torno a un margen mucho más estrecho.

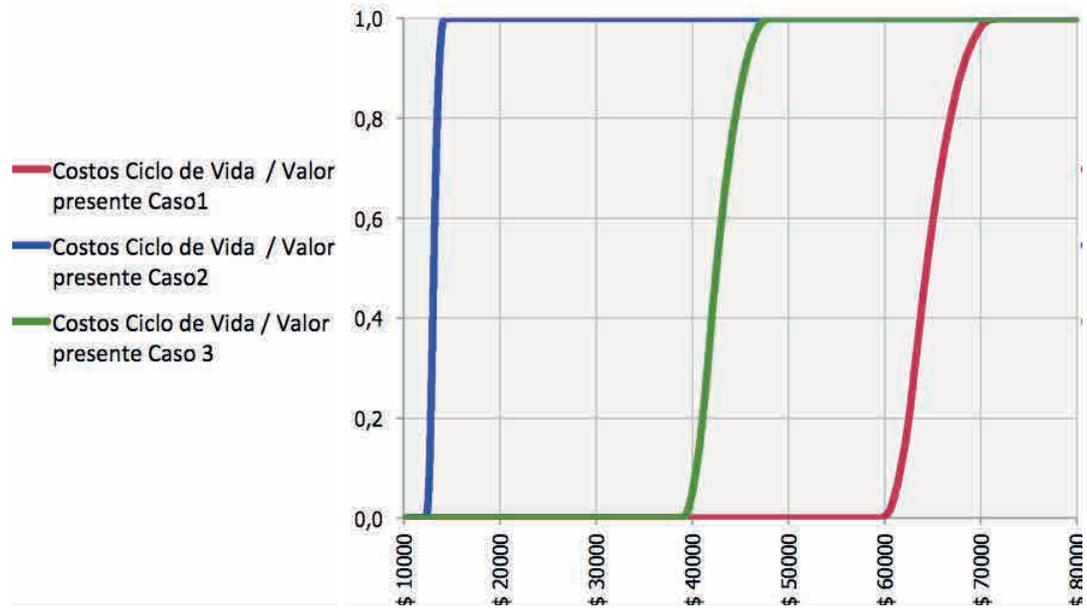


Figura.15 Caso 1, Variación LCC por cambio en valores de entrada

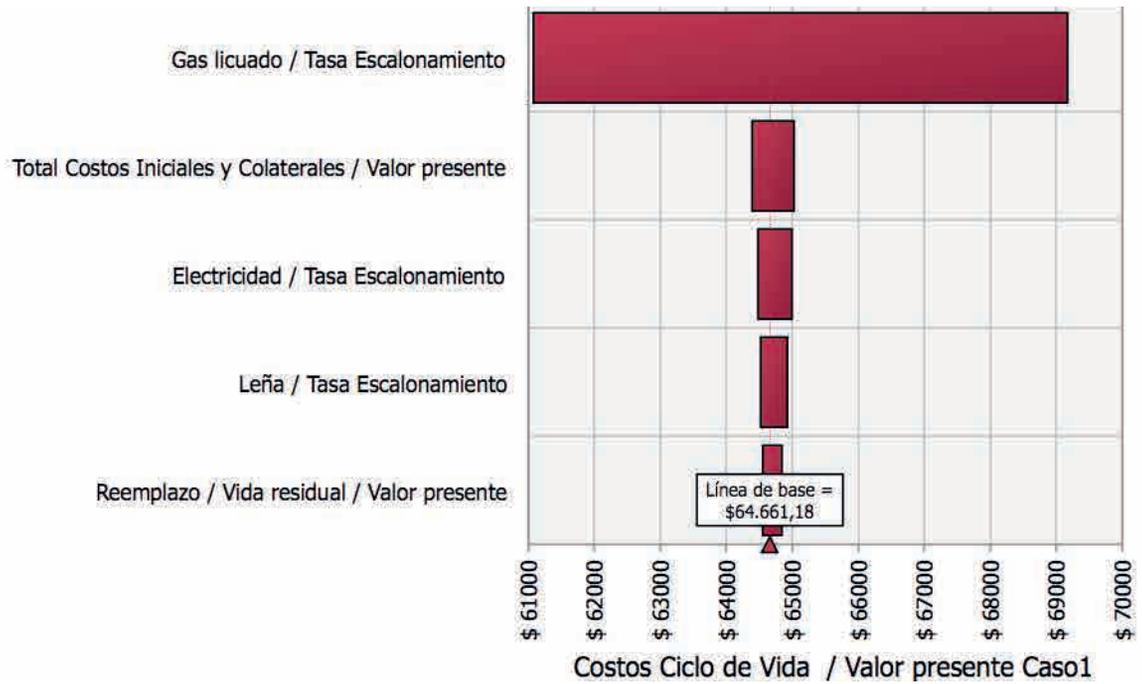


Figura.16 Caso 1, Análisis de sensibilidad mediante gráfico de tornado

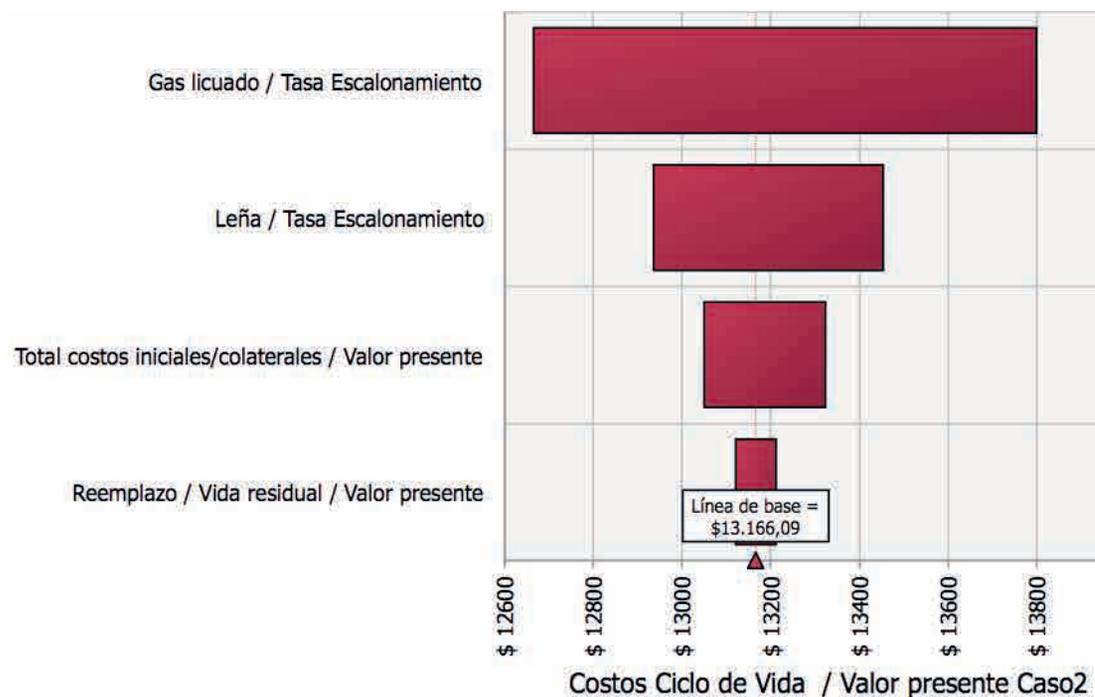


Figura.17 Caso 2, Análisis de sensibilidad mediante gráfico de tornado

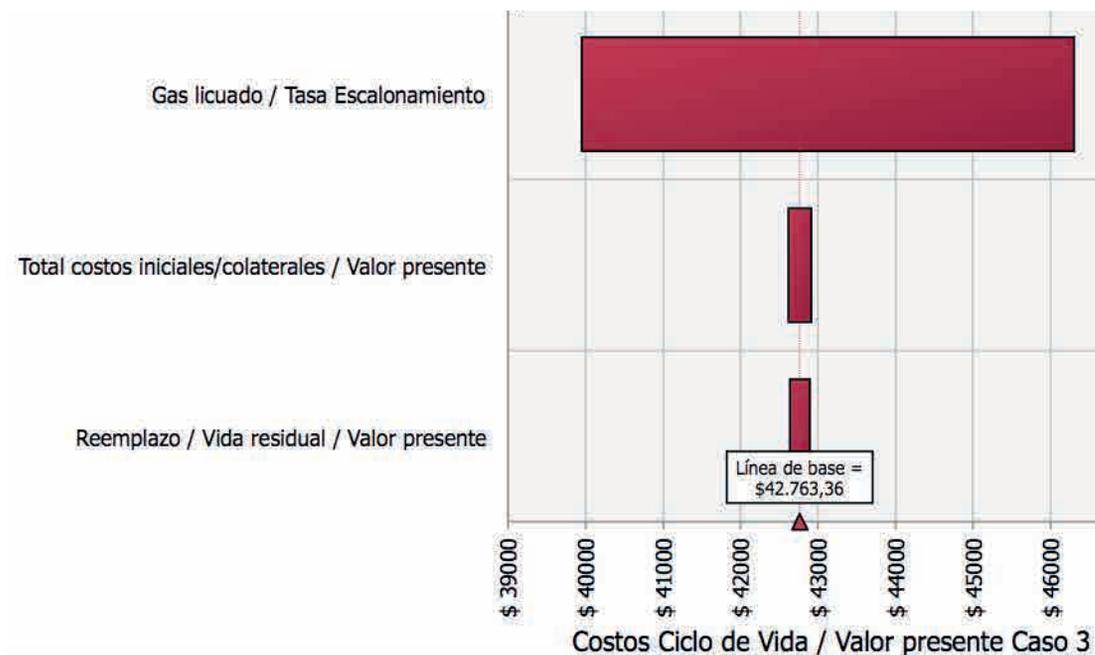


Figura.18 Caso 3, Análisis de sensibilidad mediante gráfico de tornado

Finalmente, en el Caso 3 existe un 90% de probabilidad de que el LCC se sitúe entre los USD \$40.000 y USD \$46.000. Por lo demás, la cantidad de variables de entrada que afectan el valor de salida (LCC), resultan ser menos que en el resto de casos, puesto que solo se considera el uso de calefacción por medio de gas licuado.

Tal como se observa en la figura 16, el parámetro que significativamente muestra una mayor influencia en el cambio del LCC es la variación respecto a la tasa de escalamiento del gas licuado. En segundo lugar, se encuentran los costos iniciales, seguido de la tasa de escalamiento para la electricidad y leña respectivamente, con diferencias bastante bajas entre sí. No obstante, destaca también la influencia respecto a la tasa de escalamiento de la electricidad, puesto que, su uso en relación a los demás combustibles representa un porcentaje menor de la demanda total de energía que requiere la vivienda.

Para el Caso 2, la figura 17 muestra que nuevamente un cambio respecto a la tasa de escalamiento del gas licuado resulta ser el factor que más incide en un aumento del LCC. El segundo lugar, lo representa la tasa de escalamiento para la leña, seguido por el costo de inversión inicial y los costos de remplazo. Al igual que en el Caso 1, destaca el efecto que provoca la tasa de escalamiento para el gas licuado, aun cuando la mayor parte de la demanda de energía en la vivienda se cubre por medio de la calefacción a leña. La inversión inicial y costos de remplazo representan valores más bajos que en el Caso 1, producto del menor tamaño de la vivienda, la cual repercute en una inversión inicial menor.

Finalmente, en el Caso 3, tal como se aprecia en la figura 18, otra vez la tasa de escalamiento para los combustibles constituye en el factor más influyente. El único combustible utilizado es el gas licuado, por consiguiente, es también el que más afecta el resultado obtenido.

6 CONCLUSIONES

Es posible señalar, que los resultados obtenidos demuestran la estrecha relación entre el régimen de calefacción de cada hogar y los ahorros que pudiesen producirse durante ciclo de vida de la vivienda. Además, se observa que las soluciones de mejoramiento de la resistencia térmica en muros, aplicadas en el interior, resultan más eficientes energéticamente que ejecutarlas por el exterior de la edificación. Esto, considerando que se observó regímenes de calefacción en periodos cortos y que las características de mejoramiento, como el tipo sistema EIFS, requieren que exista un nivel de calefacción más permanente para aprovechar al máximo el potencial de ahorro. Respecto a la posibilidad de implementar los diferentes sistemas de mejoramiento térmico, los resultados son variados. Para la vivienda perteneciente al Caso 1, si bien en ella se pueden obtener disminución de costos periódicos importantes por disminución de la demanda, la inversión asociada al sistema EIFS resulta estar por encima del máximo atribuible al subsidio estatal D.S.255. Esto se debe al efecto que tienen las dimensiones de la edificación. En tanto, en los Casos 2 y 3, el monto resulta ser suficiente, incluso al considerar que en este último solo puede atribuirse el monto base del subsidio, debido al año de construcción de la vivienda.

Por otra parte, el análisis económico arrojó variaciones entre los resultados obtenidos en los tres casos. Ello se puede atribuir a diferencias existentes en los regímenes de calefacción, producto de sus condiciones de ocupación, y también al tipo de combustible utilizado y al tamaño de las viviendas. Tomando en cuenta estos aspectos, el análisis de sensibilidad permitió evidenciar que, de todos los factores considerados dentro del análisis de costos de ciclo de vida, las tasas de escalamiento en los combustibles resultan ser el punto más relevante, y que, entre ellos, el gas licuado es el que provoca mayores diferencias en los resultados. Dado que la presente investigación enfocó su análisis en medir las ventajas de las determinadas soluciones térmicas para la construcción de viviendas, en términos del análisis de costos de ciclo de vida, no fue posible medir en profundidad otras características propias de cada sistema, como lo son, la disminución de los puentes térmicos, en el caso de los aplicados por el exterior, y la real aceptación de las mejoras por parte de los posibles beneficiarios. Si bien esta metodología de evaluación económica no ha sido aceptada de manera transversal por los analistas en nuestro país, representa una forma efectiva a la hora de resolver la valoración de mejoramientos en la vivienda respecto a la eficiencia energética.

Agradecimientos: FONDECYT Proyecto Regular 1120165. Evaluación de Modelos de Simulación Ambiental de Viviendas de la zona Centro-Sur de Chile – Universidad del Bío-Bío, Pontificia Universidad Católica – 2012-2015.

BIBLIOGRAFIA

- ANDJELKOVIĆ, B. V., STOJANOVIĆ, B. V., STOJILJKOVIĆ, M. M., JANEVSKI, J. N., y STOJANOVIĆ, M. B. Thermal mass impact on energy performance of a low, medium, and heavy mass building in Belgrade. *Thermal science*. 2012, vol.16, S447-S459.
- ASTM. *Standard practice for measuring life-cycle costs of buildings and building systems*. E917. 2013.
- ASTM. *Standard guide for selecting techniques for treating uncertainty and risk in the economic evaluation of buildings and building systems*. E1369. 2011.
- ASTM. *Standard practice for measuring cost risk of buildings and building systems and Ooher constructed projects*. E1946. 2012.
- BUSTAMANTE, W., CEPEDA, R., MARTÍNEZ, P., y SANTA MARÍA, H. Eficiencia energética en vivienda social: un desafío posible. En: Concurso de Políticas Públicas. *Camino al bicentenario propuestas para Chile*. Santiago: 2009, pp. 253-282.
- CORPORACIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO. *Estudio de usos finales y curva de oferta de conservación de la energía en el sector residencial de Chile*. 2010.
- CRAWLEY, D. B., MANO, J. W., KUMMERT, M., y GRIFFITHD, B. T. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and environment*. 2008, vol 43 (4), pp. 661-673.
- GARCÍA, R., TREBILCOCK, M., y SOTO, J. Mejoramiento ambiental de viviendas urbanas unifamiliares en centro-sur de Chile. *Arquitectura y urbanismo*. 2013, vol 34 (3), pp. 39-48.
- GARCÍA, R., GONZÁLEZ, A., BUSTAMANTE, W., BOBADILLA, A., y MUÑOZ, C. Características relevantes de la simulación energética de viviendas unifamiliares. *Informes de la construcción*. 2014, 66 (533): e005, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.12.108>.
- GUERRA SANTIN, O., ITARD, L., y VISSCHER, H. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch in residential stock. *Energy and buildings*, 2009, vol 41, pp. 1223-1232.
- HATT, T. *El estándar "Passivhaus" en el centro-sur de Chile un estudio paramétrico multifactorial*. Tesis doctoral. Universidad del Bío-Bío, Concepción, 2012.
- IPSOS. *Resultados estudio sistema de aseguramiento de calidad*. 2012.
- JOHANSSON, R. Case study methodology. En: *Methodologies in housing research*. Estocolmo. 22-24 September, 2003.
- KOLAITIS, D. I., MALLIOTAKIS, E., KONTOGEORGOS, D. A., MANDILARAS, I., KATSOURINIS, D. I., y FOUNTI, M. A. Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings. *Energy and Buildings*, 2013, vol 64, pp. 123-131.
- MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO. *Reglamenta programa protección del patrimonio familiar*. Decreto Supremo n°255. Texto actualizado 1 Abril 2010.
- MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO. *Listado oficial de soluciones constructivas para acondicionamiento térmico*. Edición n°11, 2014.
- PAVEZ, A. Reglamentación térmica modificaciones en desarrollo. *Sustentabit*, 2013, vol 18, pp. 10-15.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. EnergyPlus energy simulation software. [en línea]. [Consultado el 1 Septiembre de 2014]. Disponible en: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/?utm_source=EnergyPlus&utm_medium=redirect&utm_campaign=EnergyPlus%2Bredirect%2B1