

## EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGI-TÉRMICO DE UNA VIVIENDA SOCIAL EN CHILE, UTILIZANDO UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

**Sergio Vera (instructor asociado), Martín Ordenes**

Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción

Pontificia Universidad Católica de Chile.

Vicuña Mackenna 4860, Santiago – (56-2) 686 4245

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

### Resumen

Un objetivo fundamental al diseñar un espacio habitable, es asegurar el bienestar térmico de sus ocupantes, con una demanda energética compatible con las actividades desarrolladas al interior del mismo. En Chile, la vivienda social no cumple con este objetivo, debido a: (1) las viviendas no son diseñadas teniendo en mente este objetivo; (2) un alto porcentaje de las viviendas tiene superficie reducida (menor a 50 m<sup>2</sup>) con una alta tasa de ocupación; (3) los materiales componentes de la envolvente térmica (muros, pisos, techumbre y ventanas) presentan baja capacidad de aislación térmica; (4) la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción no exige requerimientos de aislación térmica de los elementos de la envolvente, excepto para el complejo techumbre a partir del año 2000. Esto produce un desmejoramiento de la calidad de vida de los usuarios, y el uso ineficiente de los recursos energéticos para la climatización de las viviendas. El objetivo de la investigación fue evaluar el efecto sobre las cargas de calefacción y refrigeración de diferentes estrategias pasivas de control térmico, tales como aislación térmica, orientación y tamaño de las superficies vidriadas, y calefacción solar pasiva, con el propósito de establecer recomendaciones para el diseño de viviendas sociales en Santiago, Concepción y Punta Arenas (climas con estación fría y/o cálida prolongada). Para este propósito se utilizó un programa de simulación de energía en edificios, llamado PowerDOE. Los principales resultados muestran importantes cargas de calefacción y refrigeración de las viviendas sin estrategias de control térmico (entre 111 y 370 kWh/año·m<sup>2</sup> para calefacción y 76 kWh/año·m<sup>2</sup> para refrigeración). Por consiguiente, las condiciones de bienestar térmico no son logradas. Por otro lado, aplicando en forma conjunta las estrategias de control térmico se observan reducciones importantes de las cargas, superiores a 45 kWh/año·m<sup>2</sup> (40%) en Santiago, y 90 kWh/año·m<sup>2</sup> (24%) en Punta Arenas.

**Palabras clave:** Cargas térmicas, bienestar térmico, programas computacionales de simulación energética de edificaciones, aislación térmica, calefacción solar pasiva.

### Abstract

*A fundamental objective to design a habitable space is to assure the occupants thermal comfort, considering an energy use compatible with the activities developed in this space. The social housing does not fulfill this objective in Chile, due to: (1) Housing design does not consider this objective; (2) a high percentage of housing has a reduced area (smaller than 50 m<sup>2</sup>) with a high rate of occupation; (3) thermal envelope (walls, slabs on grade, ceiling and windows) has low thermal insulation capacity. (4) Chilean Building Code does not demand requirements of envelope thermal insulation, except for ceiling (since 2000). This produces a reduction of users' life quality and an inefficient use of energy resources in conditioning housing. The objective of this research was to evaluate the effect on heating and refrigeration loads of several thermal control passive strategies, such as thermal insulation, windows orientation and size, and passive solar heating, in order to establish recommendations for the design of social housing in Santiago, Concepción and Punta Arenas (heating and/or cooling climates). PowerDOE, a building energy simulation software was used. The main results show important heating and refrigeration loads for the housing without thermal control strategies (between 111 and 370 kWh/año·m<sup>2</sup> for heating and 76 kWh/año·m<sup>2</sup> for refrigeration). Therefore, thermal comfort conditions are not achieved. On the other hand, the application of integral thermal control strategies produces important reductions of thermal loads, above to 45 kWh/año·m<sup>2</sup> (40%) in Santiago, and 90 kWh/año·m<sup>2</sup> (24%) in Punta Arenas.*

**Keywords:** *Thermal loads, thermal comfort, building energy simulation software, thermal insulation, passive solar heating.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La habitabilidad de las edificaciones puede ser definida como su capacidad para proveer un ambiente confortable, en términos de bienestar térmico, acústico, visual y de calidad del aire intramuros. El bienestar térmico es fundamental para proveer un ambiente confortable, diversos estudios definen una zona de confort térmico en la cual el 80% de la población presenta una sensación psicológica de agrado con el ambiente. La frontera que define la zona de confort depende de la temperatura y humedad relativa del ambiente, velocidad del aire, vestimenta de las personas, y temperatura de las superficies de los espacios. ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers) define la zona de confort con un límite inferior de 21,8°C de temperatura ambiente y 73% de humedad relativa, y un límite superior de 26,3°C de temperatura ambiente y 22% de humedad relativa, para velocidades del aire menores a 0,22 m/s (Bedoya y Neila, 1992; Fairey, 1981).

El diseño de una vivienda debería incluir una etapa enfocada a proporcionar un ambiente interior confortable térmicamente, mediante un diseño arquitectónico, uso de materiales y sistemas constructivos adecuados. No obstante, cuando las condiciones climáticas en que se encuentra localizada la vivienda son rigurosas (estación cálida y/o fría prolongada), un diseño adecuado no es suficiente para mantener los espacios interiores a una temperatura confortable, siendo necesario el uso de sistemas mecánicos de calefacción, refrigeración y ventilación, los cuales responden modificando el ambiente interior mediante un proceso de climatización, lo que se traduce en una demanda de energía.

Un objetivo fundamental al diseñar un espacio habitable, es asegurar el bienestar térmico de sus ocupantes, con una demanda energética compatible con las actividades desarrolladas al interior del mismo. En Chile, la vivienda social no cumple con este objetivo, debido a: (1) Las viviendas no son diseñadas teniendo en mente este objetivo, (2) un alto porcentaje de las viviendas tiene superficie reducida (menor a 50 m<sup>2</sup>) con una alta tasa de ocupación, (3) los materiales componentes de la envolvente (muros, pisos, techumbre y ventanas) presentan baja capacidad de aislación térmica, (4) la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción no exige requerimientos de aislación térmica de los elementos de la envolvente, excepto para el complejo techumbre a partir del año 2000.

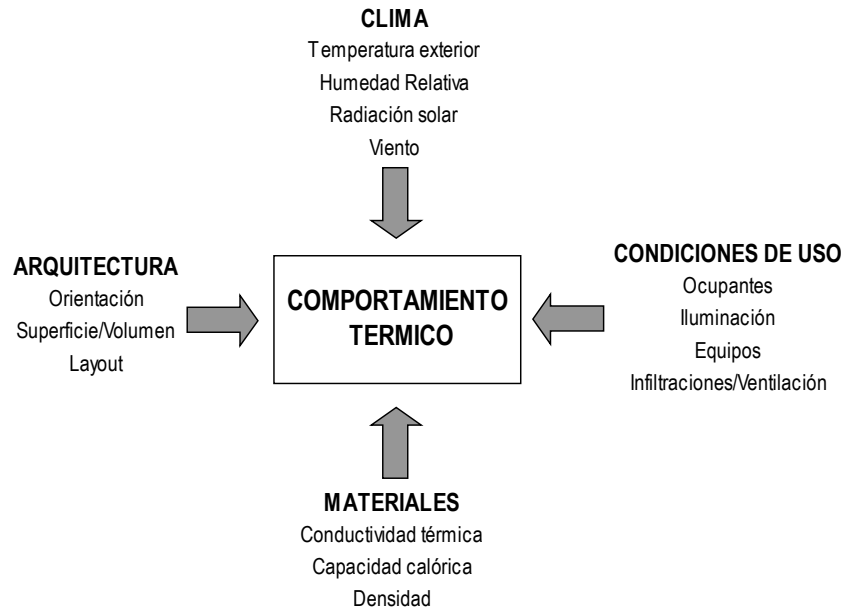
En consecuencia, las viviendas sociales, que representan un alto porcentaje del total de viviendas construidas en el país, presenta un desempeño energo-térmico deficiente, los espacios interiores permanecen durante períodos prolongados en condiciones de subcalentamiento y/o sobrecalentamiento cuando no existen sistemas de climatización, y en caso de existir, el uso de energía es ineficiente debido al inadecuado diseño de la vivienda. Por ello, se requiere mejorar el diseño de la vivienda social en Chile para proporcionar una mejor calidad de vida a los usuarios y un uso eficiente de los recursos energéticos.

Pese a que se han encontrado en la bibliografía investigaciones enfocadas hacia la modelación de viviendas sociales en Chile, es necesario complementar esta información con una evaluación de la influencia de los diferentes factores arquitectónicos y climáticos sobre las solicitaciones térmicas totales anuales. Así, el presente trabajo de investigación tiene por objetivo general evaluar el impacto de los factores de diseño de una vivienda que influyen en las cargas de calefacción y refrigeración totales anuales, mediante el uso de herramientas computacionales de simulación del comportamiento energo-térmico de edificaciones.

## 2. DESEMPEÑO ENERGI-TÉRMICO DE LAS VIVIENDAS

La vivienda es un sistema dinámico, por lo que el análisis de su comportamiento térmico no se circunscribe sólo a evaluar las propiedades térmicas de los materiales constituyentes, sino que a entender su funcionamiento como un sistema integral (Hunn, 1996). El comportamiento térmico de la vivienda depende de diversos factores (Figura 1), los que interactúan a través del tiempo y gobiernan los

mecanismos de transferencia de calor desde y hacia el interior de la edificación, cuyo resultado es la temperatura del ambiente interior. En una vivienda se producen ganancias y pérdidas de calor con respecto a la temperatura de confort (generalmente  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ). Realizando un balance térmico se puede determinar las cargas de calefacción y refrigeración requeridas para mantener la temperatura de confort en el ambiente.



**Figura 1. Factores que influyen en el comportamiento térmico de las viviendas**

Las estrategias de control térmico de las viviendas se enfocan a incrementar o reducir las ganancias y/o pérdidas de calor, dependiendo de la situación particular de cada vivienda para invierno y verano, siendo las principales:

Calefacción solar pasiva (aprovechamiento de la radiación solar para calefaccionar las viviendas a través del uso de materiales masivos en muros y radier, superficies vidriadas orientadas adecuadamente, y aislación térmica exterior).

Aislación térmica de la envolvente.

Protección solar.

Uso de materiales y elementos constructivos con propiedades térmicas adecuadas.

No obstante, las estrategias pueden tener resultados contrapuestos para condiciones de invierno y verano, por ejemplo, utilizar sistemas de protección solar en ventanas en una vivienda para reducir ganancias por radiación solar y sobrecalentamiento en verano, puede producir un incremento de las cargas de calefacción en invierno, ya que se reduce la ganancia de calor a través de superficies vidriadas.

### **3. MÉTODOS DE ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ENERGI-TÉRMICO DE VIVIENDAS**

#### **3.1 Objetivos del análisis del comportamiento energo-térmico de edificaciones**

El análisis del comportamiento energo-térmico de edificaciones consiste en utilizar algún procedimiento de cálculo manual o un programa computacional para modelar matemáticamente la interacción de los procesos térmicos de una edificación. Existe un amplio rango de modelos utilizados para este propósito, los cuales varían significativamente en su facilidad de implementación y comprensión, y en el nivel de detalle que presentan en el ingreso de datos y resultados entregados. Existen cuatro objetivos principales por los cuales se modela el comportamiento energo-térmico de una edificación (Hunn, 1996):

- **Evaluación de distintos diseños arquitectónicos:** modelar el desempeño energo-térmico de una vivienda puede ayudar al departamento de diseño a decidir entre diferentes diseños, basándose en el impacto que éstos puedan tener en las condiciones térmicas interiores y el uso de energía de climatización.
- **Expansión y perfeccionamiento de los conocimientos que se tienen sobre el uso de la energía en edificaciones:** este mejoramiento del conocimiento permite realizar mejores diseños energo-térmicos de las viviendas que integren todos sus componentes y sistemas.
- **Demostración del cumplimiento de códigos de certificación:** en países desarrollados existen códigos energéticos que deben ser cumplidos por los nuevos proyectos de edificación, debiéndose demostrar mediante el uso de modelos el cumplimiento de tales códigos.
- **Estimación de los costos de operación y mantención durante la vida útil de un edificio:** Estos datos pueden resultar muy importantes dentro de las decisiones financieras de un proyecto constructivo.

### 3.2 Programas computacionales de simulación energo-térmica

Se utilizan principalmente programas computacionales para simular su comportamiento energo-térmico de las edificaciones, debido al comportamiento dinámico de las viviendas y a la gran variedad de factores que influyen en su comportamiento energo-térmico. En el mercado existe una amplia variedad de programas de simulación, desarrollados por distintas entidades gubernamentales, privadas y universitarias. Algunos de estos programas son DOE-2 (USA), eQUEST/PowerDOE (USA), TRNSYS (USA), TAS (Inglaterra), Derob-LTH (Suecia), CAPSOL (Bélgica) y ALF (Nueva Zelanda), entre otros. Dependiendo del programa y objetivos específicos de la simulación, los requerimientos de datos de entrada varían, así como también los resultados entregados. La validez de los resultados obtenidos por estos programas ha sido comprobada en varios años de estudio por distintas entidades de investigación y empresas consultoras de ingeniería y arquitectura en el diseño de proyectos de edificación. Sin embargo, existen diferencias en los resultados proporcionados por los distintos programas (Hunn, 1996).

Programas computacionales como PowerDOE (el cual fue utilizado en la presente investigación), VisualDOE y eQUEST tiene un motor de cálculo llamado DOE-2, el cual fue desarrollado por el Lawrence Berkeley National Laboratory, Hirsch&Associates, entre otros, y apoyado por el U.S. Department of Energy. En general, los programas que tienen como motor de cálculo DOE-2, presentan la estructura de funcionamiento que se muestra en la Figura 2. El modelo CARGAS, calcula las cargas de calefacción y refrigeración (o cargas térmicas) para cada espacio de la edificación, en base a un balance de ganancias y pérdidas de calor para mantener la temperatura de confort. En el caso que la simulación de una vivienda genere cargas de calefacción y refrigeración, éstas deberán ser cubiertas por un sistema de climatización. El modelo HVAC simula el desempeño de los equipos de climatización, con el propósito de calcular las demandas de electricidad y combustibles del edificio. El modelo ECONÓMICOS calcula el costo de la energía, este puede ser usado para comparar la razón costo-beneficio de diferentes diseños o para el cálculo de ahorros de energía derivados de un mejoramiento en un edificio existente (BTS, 2001; JJH, 1996).

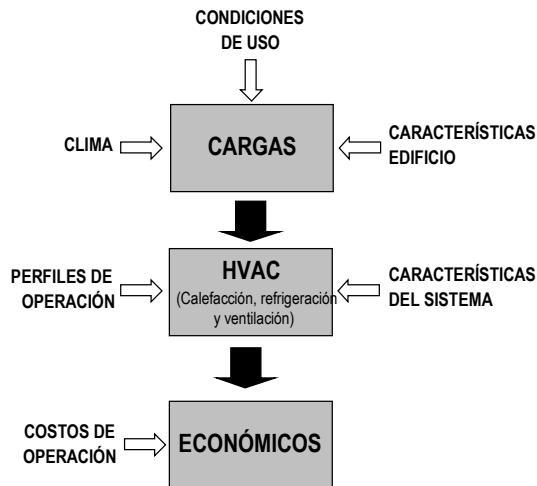


Figura 2. Estructura funcionamiento programas basados en DOE-2

#### 4. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El propósito de la presente investigación fue evaluar el comportamiento energo-térmico de una vivienda social en Chile mediante la obtención de las cargas térmicas (no hay dependencia del sistema HVAC), para lo cual se utilizó un programa computacional de simulación (PowerDOE). También, se evaluaron diferentes estrategias de control térmico con el propósito de generar recomendaciones de diseño de viviendas sociales en las ciudades de Santiago, Concepción y Punta Arenas. La metodología de investigación se muestra en la Figura 3, y los aspectos más relevantes se describen a continuación:

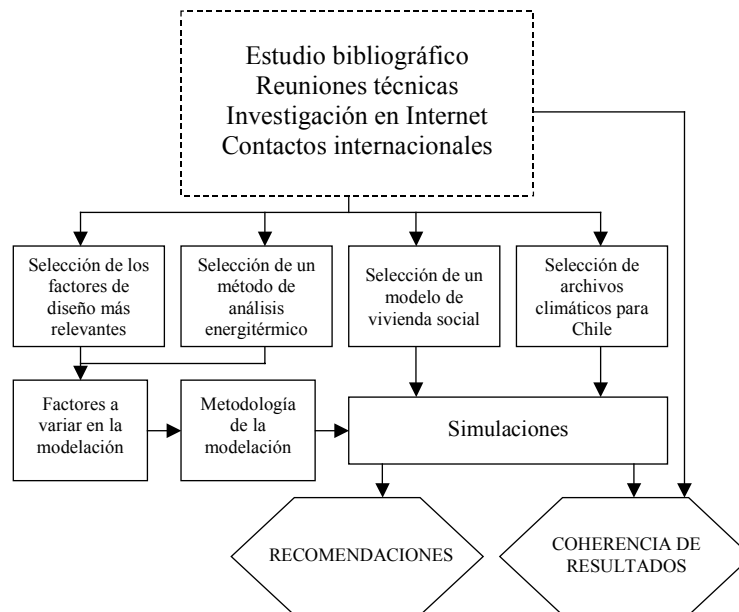


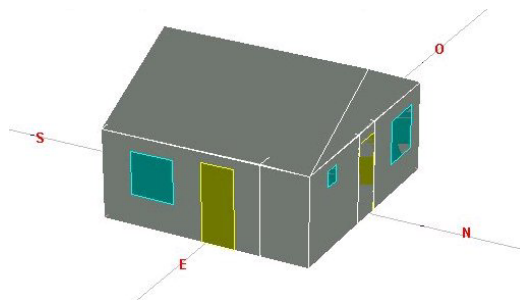
Figura 3. Esquema metodología de investigación

- Selección del método de análisis energo-térmico:** se evaluaron diferentes características de los programas de simulación del comportamiento energo-térmico de edificios, seleccionándose el programa PowerDOE. Este programa permite obtener en forma horaria y mensual las cargas térmicas de la vivienda, el motor de cálculo (DOE-2) es de validez probada, y presenta una interfaz gráfica “amigable”. Las principales deficiencias del programa corresponden a la dificultad de exportación de los resultados (por ejemplo a archivos del tipo xls), y presenta problemas de inestabilidad funcional.

- Datos climáticos:** Para situar las modelaciones dentro de las condiciones climáticas de Chile, se utilizaron los datos generados por la ASHRAE como parte del proyecto 1015-RP “Typical Weather Years for International Locations”, (Thevenard y Brunger, 2001). Este proyecto consideró el siguiente procedimiento para generar los archivos TMY (Typical Meteorological Year): según datos meteorológicos recolectados por la ASHRAE, se seleccionaron 18 años representativos para cada localidad. Luego, entre los 18 años representativos, se seleccionaron 12 “meses típicos” mediante una comparación estadística, principalmente según parámetros de radiación solar global total, temperatura de bulbo seco, temperatura del punto de rocío y velocidad del viento. Por último, mediante algoritmos de interpolación y simulaciones, se crearon los archivos TMY concatenando los 12 meses típicos.

Para desarrollar la presente investigación se han seleccionado los archivos de las ciudades de Santiago, Concepción y Punta Arenas. Esta selección corresponde a las zonas climáticas 3, 4 y 7 respectivamente, definidas en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC, 1999).
- Vivienda:** se seleccionó una vivienda social de 32 m<sup>2</sup>, construyéndose un modelo virtual en el programa PowerDOE (Figura 4). Se consideró el uso de muros de albañilería de ladrillo de 14 cm o estructura de madera de 10 cm. Para el complejo techumbre se utilizó la aislación térmica de acuerdo a lo estipulado Ordenanza General de Urbanismo y Construcción para cada zona climática evaluada.
- Temperatura de confort para el cálculo de cargas:** en la presente investigación se utilizaron dos temperaturas de confort para el cálculo de cargas térmicas, dependiendo si se evalúa cargas de calefacción o refrigeración. Basados en la norma NZ4218:1996 – Energy efficiency: Housing and small building (New Zealand Standards, 1996), se utilizaron las temperaturas de confort de 18°C y 27°C para calefacción y refrigeración respectivamente.
- Modelación de infiltraciones, espesor del radier, y cargas internas:** se consideró que estos parámetros podrían tener un grado de influencia importante en los resultados obtenidos, por ello se realizó un análisis previo de estos factores. Para infiltraciones, los resultados muestran que por cada renovación de aire adicional por hora, las cargas de calefacción aumentan en un 30% y 20% para Santiago y Punta Arenas respectivamente. Para la presente investigación se utilizó una tasa de renovación de aire de 2 volúmenes/hora.

En cuanto al espesor del radier, no se encontró variaciones significativas en las cargas de calefacción y refrigeración para espesores entre 10 cm y 15 cm, utilizándose el valor menor. Se consideró en la modelación un espesor de suelo bajo el radier, que sí tiene un efecto sobre los resultados obtenidos (Pollard y Stoecklein, 1998). Las cargas internas derivadas de personas y equipos fueron modeladas con el valor recomendado por el programa (11 Wh/m<sup>2</sup>).



**Figura 4. Modelo de vivienda social simulada generado en PowerDOE (orientación norte)**

## 5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En una primera etapa, las simulaciones fueron realizadas para las 3 ciudades sin aislación térmica de muro, y en las orientaciones cardinales principales. Posteriormente se evaluó el efecto de diferentes factores: (1) Orientación; (2) aislación térmica de muros – espesor y localización con respecto al muro; (3) calefacción solar pasiva, efecto combinado del uso de muros masivos (albañilería), aislación térmica

del muro, y orientación/superficie de las ventanas; (4) vidrio doble; y (5) aislación térmica de la losa. Los resultados de las simulaciones se presentan en las siguientes secciones.

### 5.1. Clima y orientación de la vivienda

Según el lugar en que se encuentre ubicada la vivienda, las solicitudes térmicas variarán de acuerdo a las condiciones climáticas de la zona. De la misma manera, los elementos o componentes arquitectónicos pueden adquirir una relevancia distinta en cada uno de los climas. Los resultados corresponden a la vivienda con muros de albañilería en Santiago y Concepción, y con muros de madera en Punta Arenas, todas ellas sin aislación de muros, lo cual representa la práctica más común en cada localidad.

Dentro de cada localización, la vivienda tendrá un desempeño diferente según sea su orientación, debido al efecto de las ganancias de calor por radiación solar a través de las superficies vidriadas. Generalmente en Chile, las fachadas que reciben mayor radiación solar son la fachada norte y la fachada poniente. La Tabla 1 muestra las cargas totales anuales para las cuatro orientaciones cardinales de la vivienda. Se observa que cuando la vivienda se orienta hacia el norte y poniente las cargas de calefacción son menores, no obstante, en estas mismas orientaciones se producen las mayores cargas de refrigeración.

La Tabla 2 muestra el promedio anual por m<sup>2</sup> en todas las orientaciones de las cargas de calefacción y refrigeración. Los resultados son coherentes con las solicitudes climáticas de cada localidad.

**Tabla 1. Cargas de calefacción y refrigeración anuales en kWh por orientación de la vivienda.**

		Norte	Este	Sur	Oeste	PROMEDIO
<b>SANTIAGO</b>	Calefacc.	3086	3614	3797	3437	3483
	Refriger.	2347	2104	2421	2687	2390
	<b>Totales</b>	<b>5433</b>	<b>5718</b>	<b>6218</b>	<b>6124</b>	<b>5873</b>
<b>CONCEPCIÓN</b>	Calef	3864	4379	4619	4304	4291
	Refrig	639	521	588	764	628
	<b>Totales</b>	<b>4503</b>	<b>4900</b>	<b>5207</b>	<b>5068</b>	<b>4919</b>
<b>PUNTA ARENAS</b>	Calef	11175	11872	12151	11459	11664
	Refrig	0	0	0	0	0
	<b>Totales</b>	<b>11175</b>	<b>11872</b>	<b>12151</b>	<b>11459</b>	<b>11664</b>

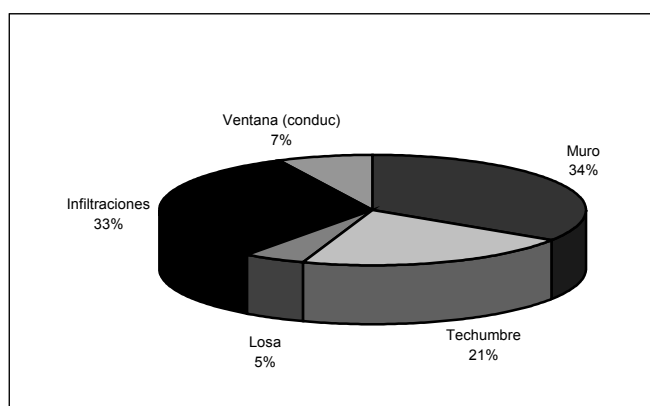
NOTA: La orientación norte corresponde a la indicada en la Figura 4.

**Tabla 2. Cargas de calefacción y refrigeración promedio en kWh/año·m<sup>2</sup> para cada localidad.**

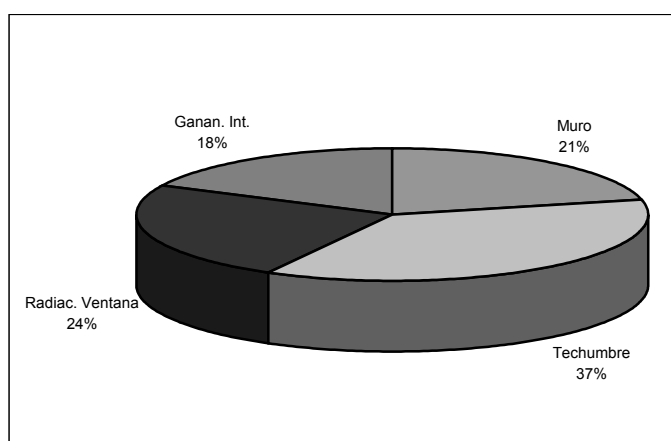
	Calefacción	Refrigeración	Total
Santiago	111	76	186
Concepción	136	20	156
Punta Arenas	370	0	370

Las Figuras 5 y 6 muestran los elementos de la vivienda que generan las cargas de calefacción y refrigeración respectivamente, como promedio para todas las orientaciones. En la Figura 5 se observa que las principales solicitudes de calefacción se producen por pérdidas de calor por conducción a través de muros e infiltraciones. Cabe destacar que también son importantes las pérdidas a través del complejo techumbre, la cual posee aislación térmica de acuerdo a la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción. Por lo tanto, sólo utilizar aislación en la techumbre no es suficiente para reducir las pérdidas de calor, sino que se requiere también aislación en los muros, reducir las infiltraciones por puertas y ventanas, e incluso incrementar el nivel de aislación de la techumbre.

Por otro lado, las cargas de refrigeración se encuentran presentes sólo en las ciudades de Santiago y Concepción. La Figura 6 muestra que las principales solicitudes de refrigeración se producen por ganancias de calor a través de la techumbre y superficies vidriadas, siendo necesaria la utilización de barreras radiantes en techumbres y sistemas de protección solar.



**Figura 5. Efecto sobre las cargas totales de calefacción de los componentes de la vivienda**



**Figura 6. Efecto sobre las cargas totales de refrigeración de cada uno de los componentes de la vivienda**

## 5.2. Aislación térmica

El uso de aislación térmica de los muros es necesario para mejorar el comportamiento energético de las viviendas, y no es actualmente contemplado en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción. Al utilizar una aislación térmica de muros (interior para albañilería y en las cavidades para madera) de 5 cm de espesor ( $R = 1,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ) se obtienen reducciones en las cargas de calefacción entre 25 y 42 kWh/año·m<sup>2</sup> (Tabla 3). Estos resultados son consecuencia de la reducción en las pérdidas de calor a través de muros por conducción, 41% en Santiago y Concepción, y 23% en Punta Arenas.

**Tabla 3. Reducción de las cargas térmicas anuales por el uso de aislación térmica de muros**

		S/Aislación (kWh)	C/Aislación (kWh)	Reducción (kWh/año·m <sup>2</sup> )
<b>SANTIAGO</b>	Calefacción	3462	2672	<b>25,1</b>
	Refrigeración	2384	2270	<b>3,6</b>
	<b>TOTAL</b>	5846	4942	<b>28,7</b>
<b>CONCEPCIÓN</b>	Calefacción	4241	3402	<b>26,6</b>
	Refrigeración	622	621	<b>0</b>
	<b>TOTAL</b>	4863	4023	<b>26,7</b>
<b>PUNTA ARENAS</b>	Calefacción	11663	10340	<b>42,0</b>
	Refrigeración	0	0	<b>0</b>
	<b>TOTAL</b>	11663	10340	<b>42,0</b>

NOTA: Estos resultados consideran el promedio de las cargas para la orientación norte y sur.

Sin embargo, se puede obtener mejores resultados que sólo utilizando aislación térmica de muros, mediante un diseño de la vivienda que considere calefacción solar pasiva. Esta estrategia consiste en un



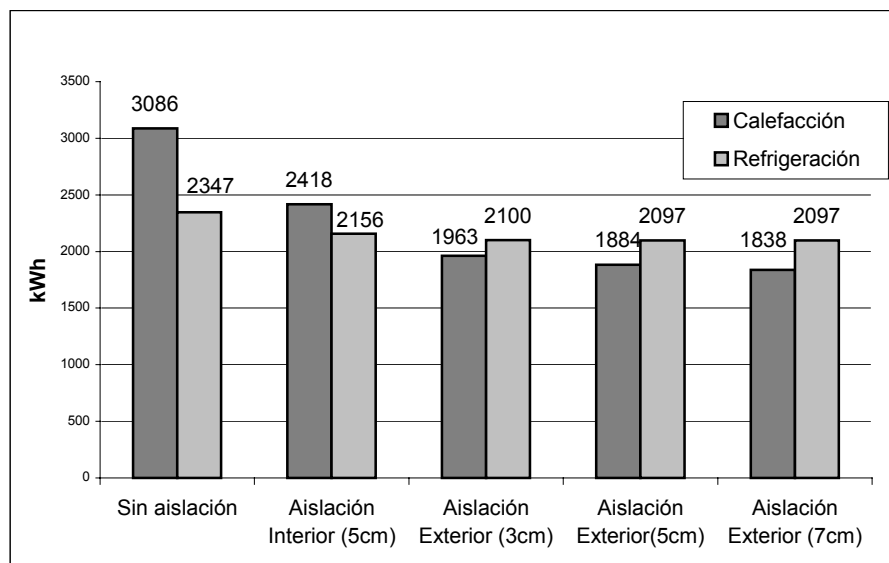
diseño que incremente las ganancias de calor por radiación solar a través de: (1) superficies vidriadas en la orientación norte y poniente; (2) uso de elementos masivos (muros de albañilería y radier de hormigón) que tiene la capacidad de almacenar calor (inercia térmica); (3) y la localización exterior de la aislación térmica, para reducir la tasa de pérdida del calor almacenado por los muros masivos. Esta estrategia de control térmico, permite disminuir las fluctuaciones de temperaturas en los espacios interiores, amortiguando las temperaturas mínimas, lo que se traduce en una disminución de las cargas de calefacción (Pollard y Stoecklein, 1998). Las cargas de refrigeración también son reducidas, sin embargo, si el diseño no es adecuado esta estrategia puede producir un incremento de las cargas de refrigeración bajo ciertas condiciones climáticas y de uso de la vivienda.

La Figura 7 muestra que con esta estrategia, en Santiago se obtiene una importante reducción de las cargas de calefacción y refrigeración ( $44 \text{ kWh/año}\cdot\text{m}^2$ ), utilizando un espesor de sólo 3 cm de aislación por el exterior del muro ( $R = 0,75 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ ). Esta disminución de las cargas es significativamente mayor que al utilizar 5 cm de aislación por la cara interior del muro ( $28,7 \text{ kWh/año}\cdot\text{m}^2$ ).

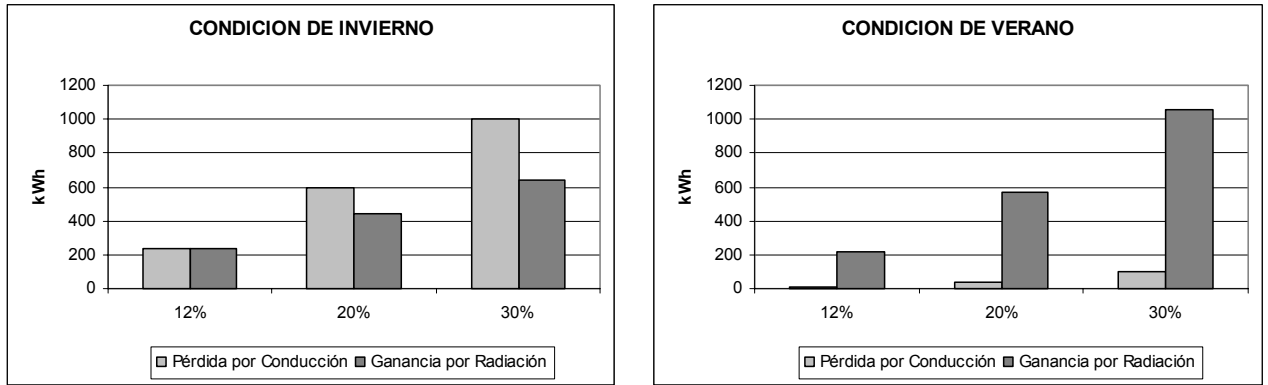
Un aspecto importante al implementar la estrategia de calefacción solar pasiva en Santiago, es seleccionar una apropiada superficie de ventanas y su orientación. Para evaluar el efecto de la superficie de ventanas con respecto a la superficie total de fachadas, se realizaron simulaciones con 12% (corresponde al original de la vivienda modelada), 20% y 30% de superficie de ventanas. Mientras mayor es la superficie de ventanas, las cargas térmicas totales se incrementan entre un 6 y 11%. La Figura 8 muestra la relación entre las ganancias y pérdidas de calor a través de las ventanas al incrementar la superficie. En invierno, el incremento de las cargas de calefacción se produce porque las pérdidas por conducción aumentan más que el incremento de las ganancias por radiación solar, y en verano, las cargas de refrigeración aumentan debido al importante incremento de las ganancias por radiación solar versus un leve incremento de las pérdidas por conducción a través de las ventanas. También, es fundamental reducir las infiltraciones de aire mediante un mejor sellado de puertas y ventanas.

Además, en Santiago es necesario reducir las altas cargas de refrigeración (40% del total), por ejemplo mediante el uso de barreras radiantes en el complejo techumbre. Levins et al (1986) indica que las barreras radiantes pueden reducir hasta en un 39% las cargas de refrigeración.

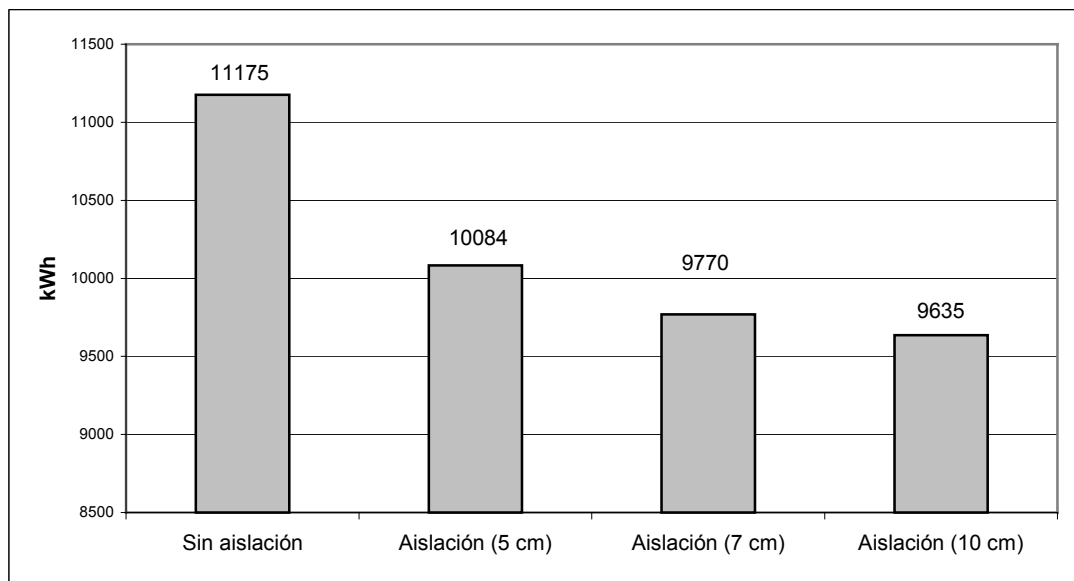
En Punta Arenas, para la orientación norte, se puede observar que una aislación de 7 cm ( $R = 1,75 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ ) ubicada en las cavidades de los muros de madera resulta más eficiente en la reducción de las cargas de calefacción en comparación con una aislación de 5 cm, reduciendo las cargas de calefacción en  $45 \text{ kWh/año}\cdot\text{m}^2$ , espesores mayores de aislación sólo tienen un efecto marginal (Figura 9)



**Figura 7. Importancia de la ubicación y espesor de la aislación en las cargas térmicas de Santiago (Orientación norte, muro de albañilería)**



**Figura 8. Efecto de la superficie de ventanas sobre las ganancias y pérdidas de calor a través de superficies vidriadas (Santiago).**

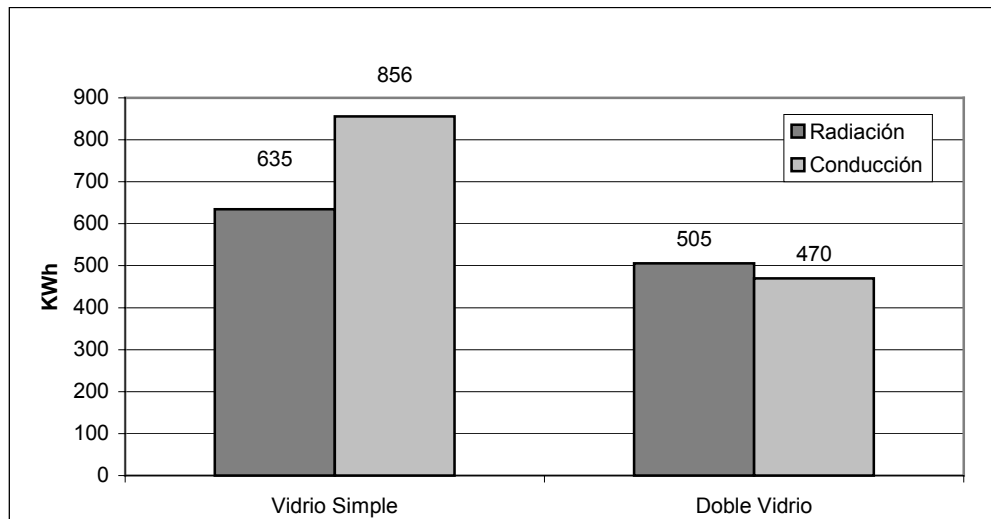


**Figura 9. Efecto del espesor de la aislación en los muros sobre las cargas de calefacción en Punta Arenas (Orientación norte, muros de madera)**

### 5.3. Uso de doble vidrio y aislación térmica del radier en Punta Arenas

En la ciudad de Punta Arenas, debido a las bajas temperaturas mínimas durante el año, resulta importante considerar un sistema de aislación que incluya a toda la envolvente y no sólo a los muros y techumbres. De esta forma, tomando como base la vivienda con muros de madera, aislación de 7 cm, y con orientación norte, se modificó la configuración de las ventanas utilizando un vidrio doble en cada una de ellas (dos vidrios claros de 3 mm, con un espacio de aire de 6 mm). Los resultados de la simulación muestran que existe una reducción de 16 kWh/año·m<sup>2</sup> en las cargas anuales de calefacción, debido a la disminución del calor que se pierde por conducción a través de estos elementos. Es importante mencionar que al colocar un vidrio doble en las ventanas, la ganancia de calor en el interior de la vivienda debido a la radiación solar también se ve afectado, sin embargo, la reducción de calor que se pierde por conducción representa la mejora más importante de esta aplicación (Figura 10).

Otro elemento importante en cuanto a las pérdidas de calor en climas fríos es el radier o losa contra suelo. En el caso de Punta Arenas, simulaciones para la vivienda con 7 cm de aislación de los muros de madera, doble vidrio, con orientación norte, y considerando una aislación térmica del radier de 3 cm ( $R = 0,75 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ), muestran una reducción de las cargas de calefacción de 21 kWh/año·m<sup>2</sup>, debido a la reducción de las pérdidas de calor por conducción a través de la losa.



**Figura 10. Efecto del uso de doble vidrio sobre el desempeño térmico de la ventana en Punta Arenas**

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La investigación realizada, muestra que existen cargas de calefacción y refrigeración importantes en la viviendas sociales en Chile: 186, 156 y 370 kWh/año·m<sup>2</sup> para Santiago, Concepción y Punta Arenas respectivamente. El mayor porcentaje de estas cargas es de calefacción, aunque en Santiago las cargas de refrigeración representan el 40% del total. Esto muestra que el diseño actual de la vivienda social evaluada, con muro albañilería sin aislación en Santiago y Concepción, y muro de madera sin aislación en Punta Arenas, no presenta condiciones de bienestar térmico, y los requerimientos de energía para climatización son altos.

Las principales causas de las cargas de calefacción de la vivienda social se producen por pérdidas de calor derivadas de conducción a través de muros (34%) y del complejo techumbre (21%), y por infiltraciones de aire (33%). Esto muestra que aislar térmicamente la envolvente, mejoraría el comportamiento energo-térmico de la vivienda, por ejemplo el uso de aislación térmica ( $R = 1,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) por el interior en el muro de albañilería y en las cavidades del muro de madera, reduce en promedio las cargas de calefacción y refrigeración entre 25 y 42 kWh/año·m<sup>2</sup>, dependiendo de la ciudad. Pero sólo utilizando aislación térmica no se asegura un adecuado comportamiento energo-térmico de la vivienda, sino que se debe integrar con otras estrategias de control térmico.

Si en Santiago se considera un diseño adecuado, que permita un mejor aprovechamiento de la radiación solar como fuente de energía de calefacción, uso de muros masivos como albañilería y radier de hormigón, con una adecuada orientación (norte y poniente) y tamaño de las superficies vidriadas (12% con respecto a la fachada), y con aislación por el exterior del muro (3 cm -  $R = 0,75 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ), se produce una reducción en las cargas de calefacción y refrigeración de 44 kWh/año·m<sup>2</sup>, reducción mayor que sólo utilizando aislación térmica de 5 cm por el interior. Además, un mejor sellado de puertas y ventanas debe ser implementado, para reducir en forma significativa la tasa de infiltraciones.

En Punta Arenas, donde existen únicamente cargas de calefacción, las principales reducciones se logran mediante el uso de: (1) aislación térmica en muros de 7 cm ( $R = 1,75 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ), lo cual reduce las cargas en 45 kWh/año·m<sup>2</sup>; (2) sellado de marcos en puertas y ventanas; (3) aislación térmica de 3 cm ( $R = 0,75 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) del radier, reduciendo las cargas en 21 kWh/año·m<sup>2</sup>; (4) y el uso de doble vidrio en todas las ventanas produce una reducción de 16 kWh/año·m<sup>2</sup>.

Los resultados muestran que aplicando las estrategias de control térmico, también se producen cargas térmicas en las ciudades investigadas, lo cual es producto de las rigurosas condiciones climáticas, que no permiten alcanzar temperaturas interiores confortables sólo utilizando técnicas pasivas, sino que se requiere adicionalmente la implementación de un sistema de climatización, principalmente de calefacción.

El diseño de una vivienda desde el punto de vista de su comportamiento energo-térmico tiene que ser parte fundamental del diseño, junto al diseño arquitectónico, diseño estructural y otras especialidades. Ya que un adecuado diseño, que incluya en forma integral elementos como orientación de la vivienda, condiciones de uso, materiales y arquitectura, permite reducir las cargas térmicas de la vivienda. En el caso de la presente investigación, las cargas térmicas fueron reducidas en más de un 40% en Santiago (sin considerar disminución por infiltraciones ni por uso de barreras radiantes), y sobre un 24% en Punta Arenas (sin considerar disminución por infiltraciones). Esto indica, que se reducen los períodos de tiempo en que se produce sobrecalentamiento y subcalentamiento del espacio interior, y en aquellos casos que se utilice energía para climatización, se reduce el consumo de energía.

Por otro lado, el programa de simulación PowerDOE, genera resultados coherentes en cuanto al efecto de los diferentes factores que influyen en el comportamiento energo-térmico de una vivienda, y permite evaluar al mismo tiempo una gran variedad de factores como el clima, arquitectura, condiciones de uso y materiales, que mediante métodos de cálculo manuales no es posible realizar. Este programa, así como otros similares, presenta un potencial uso para diseñar no sólo viviendas residenciales, sino todo tipo de edificaciones desde el punto de vista de su desempeño energo-térmico, evaluar el efecto de distintas estrategias de control térmico, y establecer los costos de operación de los edificios durante su vida útil.

## 7. REFERENCIAS

- BEDOYA, C. y NEILA, F. (1992), Las técnicas de acondicionamiento ambiental: Fundamentos arquitectónicos. Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas, Madrid, 1992.
- BTS (2001), (Office of Building Technology, State and Community Programs). Tools Directory [en línea]. Actualizado el 8 de Noviembre de 2001 [citado el 15 de Enero de 2002].  
Disponble en: [http://www.eren.doe.gov/buildings/tools\\_directory/](http://www.eren.doe.gov/buildings/tools_directory/)
- FAIREY, P. (1981), Passive cooling and human comfort. Cape Canaveral, University of Florida, 1981. 8p.
- HUNN, B. (1996), Fundamentals of building energy dynamics. Massachusetts, Bruce D, 1996. 538 p.
- JJH and ASSOCIATES (1996), PowerDOE quick start guide. California, Electric Power Research Institute, 1996. 108 p.
- LEVINS, W., KARNITZ, M. y KNIGHT, D. (1986), Cooling energy measurements of houses with attics containing radiant barriers. Texas, University of Texas, 1986.
- NEW ZEALAND STANDARDS (1996), NZS 4218:1996 - Energy efficiency: Housing and small building envelope. Nueva Zelanda, 1996.
- OGUC (1999), Ordenanza General de Urbanismo y Construcción para elementos de techumbres y cielos en las edificaciones. Santiago, Mayo de 1999.
- POLLARD A. y STOECKLEIN A. (1998), Heating energy and temperatures in heavy mass houses. Auckland, BRANZ, 1998. 10 p.
- THEVENARD, D y BRUNGER, A. (2001), ASHRAE research project 1015-RP: Typical Weather Years for International Locations (Final Report). Ontario, ASHRAE, 2001. 116 p.