

*High indoor comfort
and very low energy
consumption through the
implementation of the
Passive House standard in
Chile*

Alto confort interior con mínimo consumo energético a partir de la implementación del estándar "Passivhaus" en Chile



Autores

HATT T. Universidad del Bío-Bío,
thatt@ubiobio.cl
Concepción, Chile

SAELZER G. Universidad del Bío-Bío,
Concepción, Chile

HEMPEL R. Universidad del Bío-Bío,
Concepción, Chile

GERBER A. Hochschule Biberach,
Biberach, Alemania

Fecha de recepción 14/06/2012

Fecha de aceptación 19/07/2012

Resumen

El ahorro de energía es un tema muy de actualidad en Chile. En el sector de la construcción hay dos frentes divergentes: por un lado, el confort interior insuficiente y por otro, el alto consumo energético, ambos son producto de una edificación deficiente. En este artículo, se demuestra que en el centro-sur de Chile, se puede ahorrar aproximadamente un 80% de energía en climatización con construcciones que cumplen con el estándar energético, llamado estándar "Passivhaus". Junto con la posibilidad de bajar la demanda energética, se aumenta también el confort interior. A través de un estudio paramétrico, se analizaron las distintas configuraciones necesarias para cumplir con el estándar,

en tres ciudades del centro-sur de Chile. La tecnología para construir casas "Passivhaus", tales como, una alta aislación térmica, las ventanas termo paneles Low-E con argón o, los sistemas de ventilación con recuperación de calor, ya son accesibles en el mercado nacional. Sin duda, las construcciones que logran el estándar "Passivhaus" tienen un costo de inversión inicial más alto que una construcción tradicional, pero, por otro lado, una casa "Passivhaus" tiene un costo de operación aproximadamente de un 80% más bajo que una vivienda tradicional. Con este ahorro en los costos de la operación, se recupera el costo inicial más alto, durante la vida útil de la construcción.

Palabras clave: Eficiencia energética, casas pasivas, estándar Passivhaus, confort interior, ahorro energético, sustentabilidad.

Abstract

Energy saving is a very actual topic in Chile. There are two divergent realities in the construction sector: on the one hand an inadequate indoor comfort and on the other hand, very high energy consumption. Both are products of a low building quality. This article shows that it is possible to save about 80% of energy in space heating and cooling in the central-south area of Chile, with low energy buildings which reach the so-called Passive House Standard. Using this standard not only reduces the energy demand of buildings but also increases its internal comfort conditions. A parametric study was utilized in order to analyze, by what means it is possible

to meet the standard in three cities in central-south of Chile. The technologies to build Passive Houses, such as high thermal insulation, double glazing windows with Low-E coating and argon filling or ventilation systems with heat recovery are already available in the market. Without doubt, the buildings that achieve the Passive House standard have an higher initial investment cost than a traditional building, but on the other hand, a Passive House has approximately 80% lower running costs than a traditional building. Due to this saving in operating costs, it is possible to economize the higher initial cost during the lifetime of the construction.

Keywords: Energy efficiency, Passive House Standard, Passivhaus, interior comfort, energy savings.

1. Introducción

El ahorro de energía es un tema muy de actualidad en Chile. Los precios de la energía están en permanente alza, suben cada año debido a la dependencia energética de nuestro país y a la especulación de los mercados externos. Hoy, el sector residencial en Chile, consume aprox. un 25% de la energía total del país y bajar los consumos a niveles mínimos, permitirá independizarse de la fluctuación de precios de los combustibles, como el gas y el petróleo.

En Chile hay dos frentes divergentes: por un lado, el confort interior insuficiente y por otro, el alto consumo energético, ambos son producto de una edificación deficiente. Corregir estas deficiencias significa altos beneficios, por un lado, se logra elevar el estándar energético dado, aumentando el confort interior en casas donde no existen recursos económicos para climatizar y, por otro, bajan los gastos en climatización, sin bajar el nivel de confort térmico interior, en las edificaciones del nivel socioeconómico más alto.

Hoy existe una gran preocupación del Estado por lograr un mejor desempeño térmico de las edificaciones en Chile. Se introdujo, en la década pasada, una reglamentación térmica que define las exigencias térmicas mínimas para la envolvente de viviendas, específicamente, los complejos de techumbre, muros y pisos e implementará, a corto plazo, un sistema de certificación energética de viviendas (MINVU 2008) o (HERNÁNDEZ and MEZA 2011) con el objetivo de bajar el consumo energético y aumentar el confort térmico, para así, reducir las enfermedades resultado de las malas condiciones de habitabilidad, desde los simples resfríos hasta los serios problemas bronco-pulmonares.

Desde hace mucho tiempo existe, en el diseño arquitectónico, una preocupación por mejorar la calidad de vida de los habitantes, garantizando o mejorando el confort interior. Existen muchas publicaciones en las últimas décadas sobre diseño pasivo, donde se pretende incorporar estrategias para aprovechar al máximo la energía pasiva, como por ejemplo las ganancias solares.

Hoy en día, la tendencia es incorporar sistemas pasivos y complementarlos con sistemas activos. Esta complementariedad, se logra de mejor forma, a través de un diseño integrado de la envolvente y de los sistemas de climatización (Miotto, García *et al.* 2011).

La certificación energética de las viviendas tiene, en comparación al diseño pasivo, una clasificación definida, similar a la clasificación utilizada para los refrigeradores, donde se informa al consumidor, a través de una etiqueta, la eficiencia energética del equipo. Para la cla-

sificación de la edificación, primero se debe establecer un estándar, para lo cual se debe definir una escala, por ejemplo, de la A a la G, donde A es el estándar más eficiente y G el menos eficiente, en términos de consumo energético. Revisando el estado de arte internacional, se puede observar que existen algunos estándares energéticos de edificaciones muy exigentes, que pretenden lograr un máximo en eficiencia energética, que son aun más altos que el mejor (A) y que definen distintas escalas de exigencias, por ejemplo, existen estándares de bajo consumo, de cero consumos hasta de plus energía lo que significa, que la casa produce más energía que la que consume. Estos estándares se logran generalmente con sistemas de generación de energía eléctrica in situ, como los paneles fotovoltaicos los cuales tienen hasta ahora, un precio de inversión alto.

Uno de los estándares de bajo consumo energético, es el estándar "Passivhaus", implementado y desarrollado en Alemania en los años 90 por Wolfgang Feist y Bo Adamson (Feist 2006). En comparación al diseño pasivo, el estándar "Passivhaus" es un estándar energético definido con límites fijos. Este estándar ha logrado un aumento significativo en popularidad, por ejemplo, en Europa central se construyeron desde el año 1991 hasta hoy, más que 30.000 casas pasivas o "Passivhaus" (Eспенberger and Mekjian 2011) y hoy se ha logrado difundir en todo el mundo. Este año 2012, se realizó la 16ª versión del congreso internacional de las casas pasivas donde participaron más de mil personas organizado por el instituto de casas pasivas Darmstadt. En paralelo existen diferentes organizaciones alrededor del mundo, para promover el estándar, como la plataforma edificación Passivhaus en España.

La definición original del estándar Passivhaus, según Feist: (Feist 2005) es, "Una casa pasiva es una edificación en la que el confort térmico (ISO 7730) se garantiza solo por calentamiento o refrigeración del flujo de aire, de acuerdo al volumen de intercambio requerido para la calidad del aire interior (DIN 1946) sin utilizar ayuda adicional al aire recirculado".

La definición de Feist, se puede precisar, según (Krick, Feist *et al.* 2011), independiente del clima. Hay que cumplir algunos requisitos, los cuales pretenden, en primer lugar, garantizar un confort interior alto y, en segundo lugar, bajar el consumo energético. Para lograr el estándar, los criterios son:

- Garantizar condiciones de confort térmico en invierno y en verano, limitando la demanda energética de calefacción y refrigeración.
- Posibilidad de climatizar solo con el caudal de aire exterior, necesario para lograr las condiciones de higiene del aire interior.

- Limitar la temperatura mínima de la superficie interior de la envolvente para evitar el riesgo de condensación y el crecimiento de moho.
- Limitar la temperatura mínima de la superficie interior de la envolvente para garantizar un confort térmico interior alto.
- Limitar la velocidad de aire para no tener el efecto negativo de sentir una corriente de aire.
- Limitar las infiltraciones de aire por medio de una alta hermeticidad de la envolvente (muros, ventanas y puertas), además de las aberturas que dan paso a las instalaciones.
- Limitar el consumo energético de energía primaria.

Con los puntos descritos anteriormente y la experiencia de 20 años en la construcción de casas pasivas, se establecieron las siguientes condiciones límites para Europa central (Gantioler 2010): "Se cumple el estándar Passivhaus, si se consiguen todos los parámetros de los siguientes requisitos":

- Demanda máxima para calefacción de 15 kWh/m²a
- Demanda máxima para refrigeración de 15 kWh/m²a
- Para edificios calefaccionados y refrigerados por aire, se acepta como alternativa, también, el conseguir una carga suplementaria, para frío y calor, menor de 10 W/m².
- Hermeticidad de n50 no superior a 0,6/h, valor obtenido mediante el test de presurización "Blower Door".
- Un consumo de energía primaria para todos los sistemas (calefacción, refrigeración, ACS, electricidad, auxiliar etc.) no superior a 120 kWh/m²a
- Temperaturas superficiales interiores de la envolvente térmica durante invierno >17 °C
- La superficie de referencia (superficie neta) debe ser calculada según protocolo Passivhaus.

Estos límites son definidos para Europa central y muestran su validez en edificaciones construidas y monitoreadas, como por ejemplo, en los proyectos (Feist, Peper *et al.* 2001; Schnieders and Hermelink 2006).

En Chile no hay difusión sobre el estándar "Passivhaus" y menos, su adaptación al clima chileno, dado que existen muy pocos ejemplos de edificios construidos. Uno de ellos es una sucursal del banco BCI en Santiago (Huenchunir 2011). No existe información científica que establezca cómo adaptar el estándar Passivhaus a las condiciones locales chilenas y tampoco estudios sobre la factibilidad de la implementación masiva de este estándar. En el presente estudio se logró aclarar algunos de estos aspectos, que permitirán adecuar el estándar, a condiciones locales. Además se desarrollaron algunas recomendaciones para el diseño de casas "Passivhaus" en tres ciudades diferentes en el centro sur de Chile.

2. Metodología

En el marco de esta investigación, se creó una base teórica, con el objetivo de facilitar la implementación en Chile del estándar Passivhaus, dado que en el país no se han hecho los estudios necesarios. En muchos países, al igual que en Chile, no existe una experiencia práctica en el diseño y construcción de casas pasivas, como se ha desarrollado ya hace bastante tiempo en Europa central. Por lo tanto, el proceso de diseño y construcción de una vivienda Passivhaus en Chile es, actualmente, un largo proceso de prueba-error, que se desarrolla a través de un complejo análisis del balance energético de la vivienda, en un periodo de tiempo significativo. Este proceso puede sugerir cambiar parte del diseño, analizar nuevamente el balance energético, comprobar si cumple con el estándar y si no, repetir el proceso las veces que sea necesario. En general, estos procesos de iteración se requieren por mucho tiempo, dado que un cambio en un parámetro, influye en los otros, porque generalmente son parámetros que funcionan de manera dependiente, por ejemplo, dos parámetros dependientes son, la superficie vidriada, por un lado y, por otro, la configuración de los vidrios.

Dado que los parámetros no son independientes, se utiliza la metodología de un estudio multifactorial y no de un estudio paramétrico simple. En un estudio multifactorial, se analizan todas las combinaciones posibles, entre todos los parámetros y sus niveles estudiados. La ventaja de esta metodología es que se puede analizar, de manera conjunta, el impacto y la influencia de los parámetros y sus niveles, como operan en la realidad.

Con el estudio multifactorial, se crea una base de datos que permite extraer la información necesaria para el diseño de viviendas pasivas, en tres ubicaciones climáticas representativas del país. Las simulaciones térmicas, se ejecutan con el software EnergyPlus, versión 6.0 (EnergyPlus 2010), que es ampliamente validada (Crawley, Hand *et al.* 2008), y se automatiza para las simulaciones multifactoriales con el software de algoritmos genéricos GenOpt (Wetter 2009) y, que debido a la cantidad de simulaciones térmicas necesarias, sobre 20.000, no fue factible realizarlas manualmente.

Se analizaron múltiples casos de estudio para los diferentes climas del centro-sur de Chile, en las ciudades de Santiago, Concepción y Puerto Montt. Para cada caso de estudio, se analizó adicionalmente un caso de referencia, que permitiera comparar el ahorro energético entre una casa Passivhaus y una casa construida según la reglamentación térmica vigente (MINVU 2006). En la Ilustración 1, se graficaron los parámetros con sus distintos niveles estudiados. El total de todas

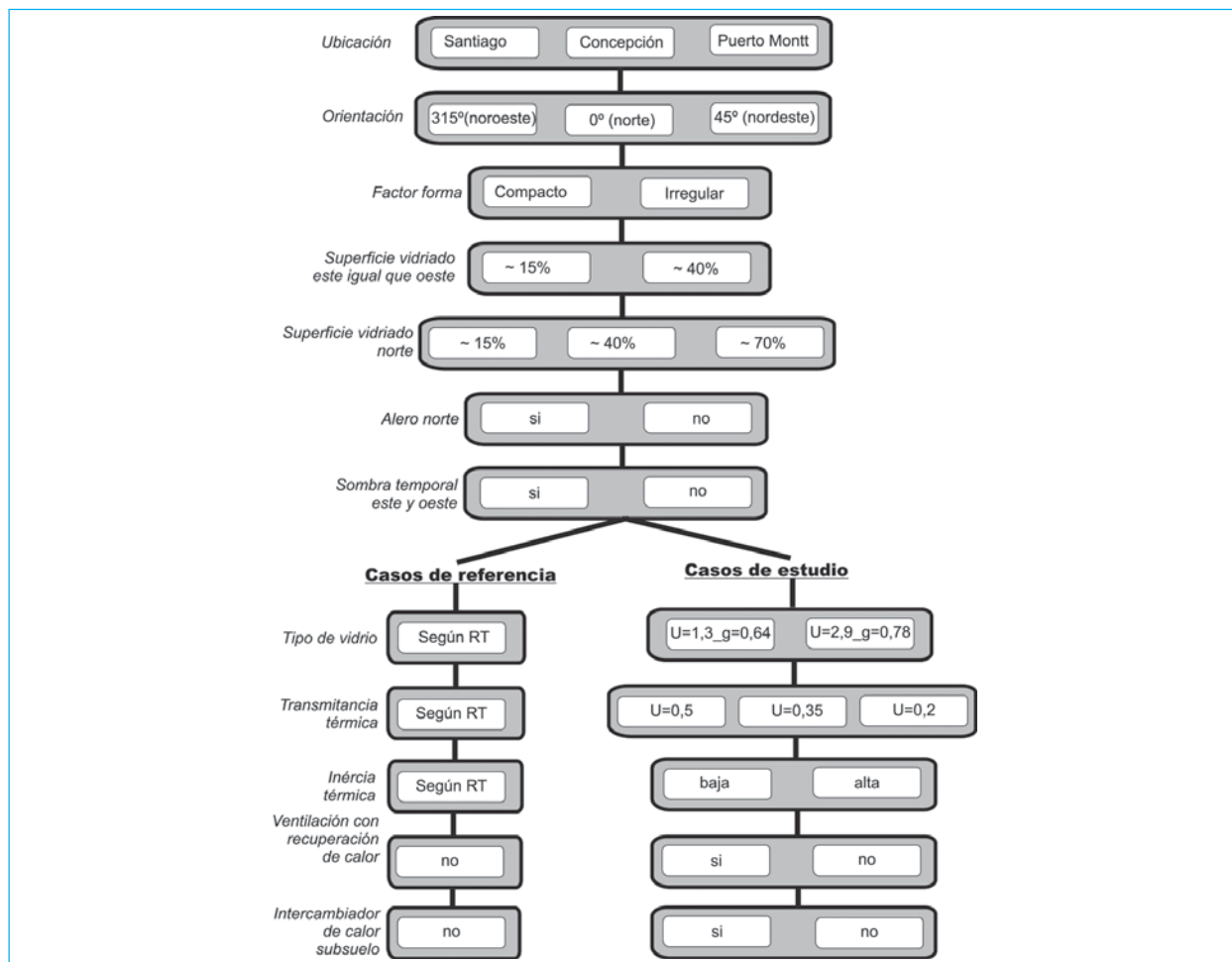
las combinaciones posibles fueron 20.736 casos de estudio, con sus casos de referencia asociados

Los rangos de los parámetros definidos son muy exigentes para poder cumplir con un estándar energético alto, dado que se busca cumplir con el estándar Passivhaus. Se considera, por ejemplo, ventanas de vidrio doble y de vidrio doble mejoradas o el rango de la transmitancia térmica de los muros, de un valor U de 0,5 a 0,2 W/(m²K). Todos los parámetros variados con sus niveles, se graficaron en la Ilustración 1. El factor de ubicación, se refiere al clima exterior; la orientación, es la desviación con respecto al norte; el factor forma o la compacidad, se refiere a la forma del volumen y se varía en dos niveles: compacta e irregular. La forma "compacta" está representada

por un cubo de dos pisos, mientras la forma irregular, se representa por una planta de geometría en U y de un piso. La inercia térmica alta, está referida a una construcción en hormigón o ladrillo y la inercia térmica baja, a una construcción liviana, de madera. Todos los casos de estudio, cuentan con una ventilación forzada, siendo analizada, una vez con recuperación de calor y otra vez sin recuperación de calor. Adicionalmente, se analiza el efecto de un intercambiador de calor subsuelo-aire.

Los casos de referencia asociados a los casos de estudio, cuentan con sus configuraciones mínimas para cumplir con la reglamentación térmica, dependiendo de la zona térmica donde se encuentra el caso de estudio.

Ilustración 1: Parámetros variados con sus niveles diferentes para los casos de estudio y los casos de referencia



Fuente: elaboración propia.

Se consideran las siguientes condiciones límites para la simulación térmica:

- Superficie construida: 100 m², altura de un piso 2.50 m, de dos pisos 5m
- Ocupación 20-25 m²/persona (durante 24 horas)
- Ganancias internas: caso de estudio 2.9 W/m², caso de referencia 5 W/m² (reducido en los casos de estudio por el uso de equipos eficientes como refrigeradores o ampolletas según el estándar "Passivhaus")
- Temperatura interior: invierno 20 °C, verano 26 °C (durante las 24 horas)
- Ventilación e infiltración:
 - caso de estudio: aire exterior 30m³/(persona y hora) por un sistema de ventilación, hermeticidad 0.6 ACH (50 Pa)
 - caso de referencia 1ACH (por ventilación e infiltración)
 - Caso de estudio y de referencia en verano: Con temperatura exterior > 23 °C => ventilación adicional de 2 ACH por apertura de ventanas

Los resultados obtenidos de las simulaciones térmicas multifactoriales para cada uno de los 20.736 casos de estudio y sus casos de referencia asociados son:

- Posibilidad (Sí/No) de climatizar solo con el flujo de aire exterior, sin utilizar aire recirculado. Se clasifican los casos como: si cumple o no cumple, con el estándar Passivhaus.
- Demanda energética para calefacción en kWh/(m²a), para los casos de estudio y sus casos de referencia.
- Demanda energética para refrigeración en kWh/(m²a), para los casos de estudio y sus casos de referencia.
- Demanda energética total (suma de refrigeración y calefacción) en kWh/(m²a), para los casos de estudio y sus casos de referencia.

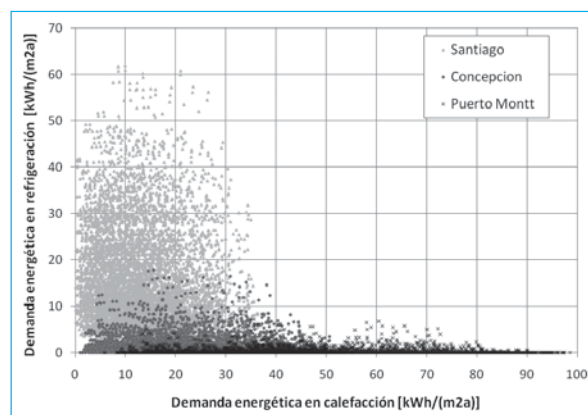
El tiempo necesario para realizar las 20.736 simulaciones tomó más que 70 horas en un computador de 4 núcleos y de 3,1 GHz, donde se pudo ejecutar 4 simulaciones en paralelo para reducir el tiempo total necesario.

3. Resultados

Uno de los resultados logrados, luego de las simulaciones térmicas realizadas es, la demanda energética en refrigeración y calefacción, para cada uno de los 20.736 casos estudiados. Estos resultados se graficaron en ilustración 2, separados por las 3 ciudades estudiadas. Una observación de carácter general es,

que en Santiago existe, en comparación con Concepción y Puerto Montt, una clara necesidad de evitar el sobrecalentamiento en verano y una posibilidad de reducir la demanda energética en refrigeración.

Ilustración 2: Demanda energética en calefacción y refrigeración de todos los 20.736 casos estudiados, indicados de manera separada para Santiago, Concepción y Puerto Montt



Fuente: elaboración propia.

En segundo lugar, se clasificaron los casos estudiados en dos grupos, el primero en los casos que cumplen con el estándar Passivhaus y en el segundo grupo, en los casos que no cumplen.

La definición original del estándar Passivhaus, según Feist (Feist 2005) es como descrito anteriormente: "Una casa pasiva es una edificación en el que el confort térmico se garantiza solo por calentamiento o refrigeración del flujo de aire exterior, de acuerdo al volumen de intercambio requerido para la calidad del aire interior, sin utilizar ayuda adicional al aire recirculado".

Por lo tanto, si se pueden climatizar los casos de estudio, solo por calentamiento o refrigeración del flujo de aire exterior necesario, los casos se clasifican como cumpliendo con el estándar "Passivhaus", si no, se clasifican como no cumpliendo. Para determinar los casos, se utilizó el número de horas del año donde el sistema de climatización no logró el confort térmico deseado. Por ejemplo: Si la temperatura de confort interior deseada en invierno es de 20° C, se contabilizan todas las horas del año donde la temperatura es inferior de 20° C, lo que significa que en todas esas

horas, el sistema de climatización no fue capaz de lograr el confort deseado. Los sistemas de ventilación que utilizan el flujo de aire exterior sin recirculación para climatizar un recinto, tienen una potencia limitada. Con las condiciones descritas anteriormente, se puede lograr una climatización a través del flujo de aire exterior, con una potencia máxima de refrigeración de 9,4 W/m² y de calefacción de 14 W/m². Esto significa que para una casa de 100 m² se requiere una potencia máxima total de refrigeración de 0,94 kW y de calefacción de 1,4 kW, esto es, similar al rango de la potencia máxima de un secador de pelo manual.

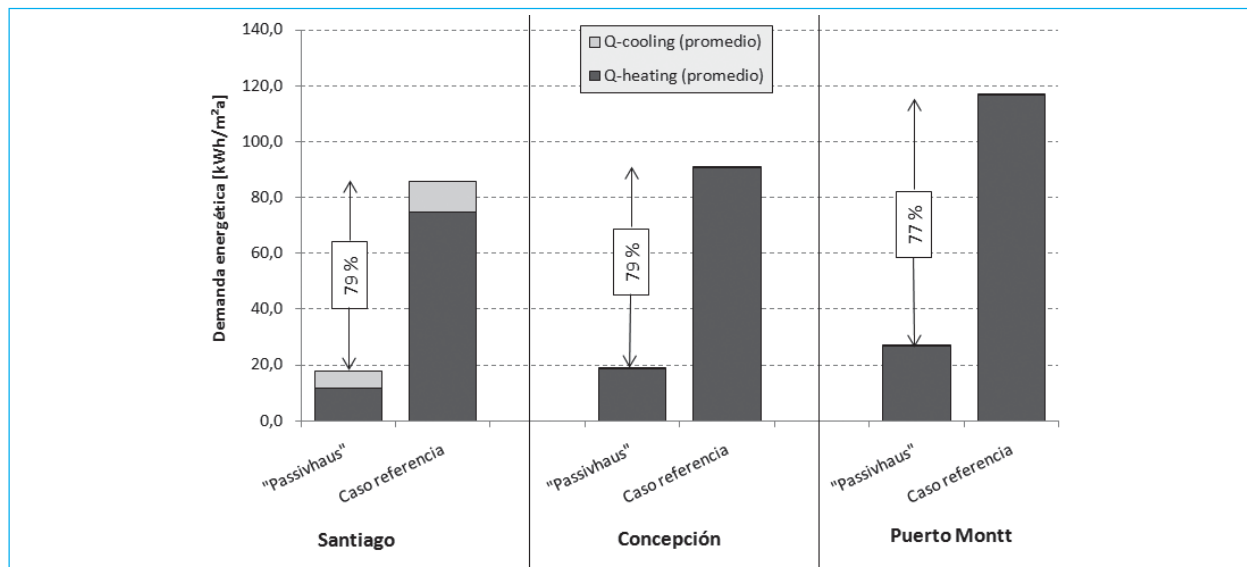
Algunos parámetros, cuando cambian su nivel, tienen una influencia más significativa que otros, con respecto al cumplimiento del estándar.

Se puede observar, que existen diferencias significativas en la influencia de los parámetros, a partir de las distintas ubicaciones geográficas y sus climas. En

Santiago se observa que los parámetros más importantes están relacionados a la protección del sobrecalentamiento en verano, mientras que en las ciudades más al sur, aumenta la importancia de los parámetros relacionados con calefaccionar los recintos.

Más adelante se compara la demanda energética de los casos "Passivhaus" con los casos de referencia que cumplen con los requisitos de la reglamentación térmica RT vigente en Chile. Los resultados muestran que las casas pasivas tienen una demanda energética claramente más baja que las casas, según la norma actual. Para realizar este análisis comparativo, se debieron hacer las simulaciones térmicas para cada uno de los 20.736 casos de estudio. La demanda energética promedio de los casos de referencia varía por zona, entre 86 kWh/(m²a) y 117 kWh/(m²a), lo que muestra una coincidencia con los resultados publicados por otros autores, como (Bustamante 2008; Bustamante, Rozas et al. 2009; Krämer and Nordsieck 2009).

Ilustración 3: Diferencia en la demanda energética en calefacción y refrigeración entre los casos de estudio que lograron el estándar casa pasiva "Passivhaus" y sus casos de referencia según reglamentación térmica RT en [kWh/(m²a)]

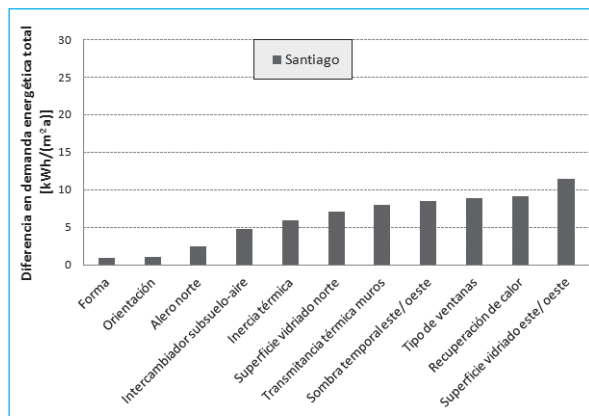


Fuente: elaboración propia.

El gráfico en ilustración 3, muestra el resultado promedio de la demanda energética de los casos en estudio que cumplieron con el estándar, comparado con los casos de referencia. Se observa que la demanda energética en calefacción de los casos en estudio que lograron el estándar es entre 10 a 25 kWh/(m²a), dependiente a su ubicación geográfica, lo que es similar a la demanda energética máxima permitida de 15 kWh/(m²a), según el estándar Passivhaus (Gantioler 2010). Los casos "Passivhaus" muestran una reducción de la demanda energética de aproximadamente 80% en comparación a los casos de referencia, lo que significa una reducción muy importante.

En el párrafo anterior, se clasificaron los casos en aquellos que cumplen con el estándar "Passivhaus" y en aquellos casos que no cumplen con el estándar. En el presente párrafo, se analiza la demanda energética de los casos de estudio. Se utiliza como variable de respuesta la demanda energética en refrigeración y calefacción durante el año tipo, la cual se obtiene de los resultados de las simulaciones térmicas dinámicas. Con la demanda energética y los rendimientos de los equipos de climatización utilizados, se puede determinar el consumo energético y los gastos en calefacción y refrigeración. La información obtenida sobre el comportamiento energético de los casos de estudio, puede ser aplicada para diseñar casas de bajo consumo energético en general y no solo en el diseño de casas pasivas.

Ilustración 4: Influencia de los factores investigados a la diferencia de la demanda energética total en Santiago



Fuente: elaboración propia.

Santiago: Se puede observar en ilustración 4, que el factor más significativo en Santiago es el porcentaje de la superficie vidriada al este/oeste y, en segundo lugar, un sistema de ventilación con recuperación de calor. Estos dos factores influyen en una sola de las dos demandas, ya sea refrigeración o calefacción. Esto significa que, la instalación o no instalación de un sistema de ventilación con recuperación de calor, no provoca un cambio en la demanda energética para refrigeración, pero sí en la demanda energética en calefacción.

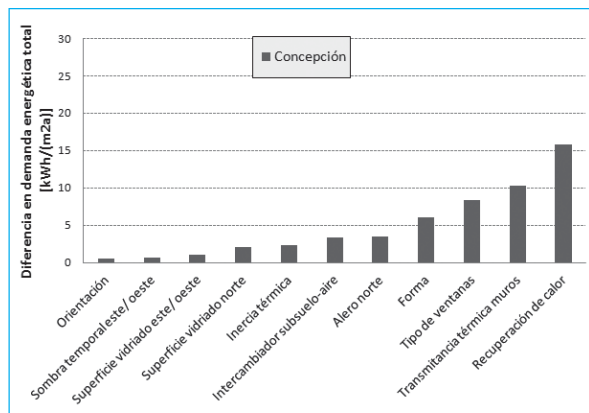
Por otra parte, hay factores que tienen influencia en ambas demandas, la de refrigeración y la de calefacción. Por ejemplo, la Forma es el factor menos significativo en la diferencia de la demanda total, pero sí, tiene una influencia en la demanda de refrigeración y de calefacción. La explicación es que, para el caso de refrigeración, la forma irregular presenta un mejor desempeño energético y para el caso de calefacción, la forma compacta es más eficiente. Por lo tanto, en Santiago, la forma de la casa no tiene mucha influencia a la demanda energética total. La misma situación ocurre con el porcentaje de la superficie vidriada al norte y con el alero norte.

Otra posibilidad es, cuando un factor tiene en un mismo nivel, el mejor desempeño para la demanda en refrigeración y calefacción. Esto ocurre, por ejemplo, con el tipo de las ventanas y la inercia térmica. Una inercia térmica alta tiene un mejor desempeño, tanto en verano como en invierno. Las ventanas termo paneles, con una capa de baja emisividad y con argón, cuentan con una transmitancia térmica más baja, lo que significa menos pérdida de calor en invierno, y por otra parte un factor solar más bajo, que reduce el riesgo de sobrecalentamiento en verano.

Concepción: Analizando las demandas de refrigeración y de calefacción por separado en la ciudad de Concepción, se puede observar, que la demanda de la energía total depende generalmente solo de la demanda en calefacción. En la ilustración 5 se graficó el resumen de la influencia de los factores y sus niveles de la demanda energética total. Se puede observar, sin embargo, que todos los factores que tienen relación con la demanda energética en calefacción son los más significativos. Estos son, en primer lugar, un sistema de ventilación con recuperación de calor, en segundo lugar, los valores U (transmitancia térmica) bajos y, en tercer lugar, las ventanas termo paneles mejoradas. En Concepción, el valor absoluto de la diferencia del factor más significativo es aprox. 15 kWh/(m²a) y en Santiago aprox. 11 kWh/(m²a). Esto indica que el factor más significativo tiene en Concepción un peso mayor que el factor más significativo en Santiago,

por lo tanto, es altamente recomendable instalar un sistema de ventilación con recuperación de calor en Concepción.

Ilustración 5: Influencia de los factores investigados a la diferencia de la demanda energética total en Concepción



Fuente: elaboración propia.

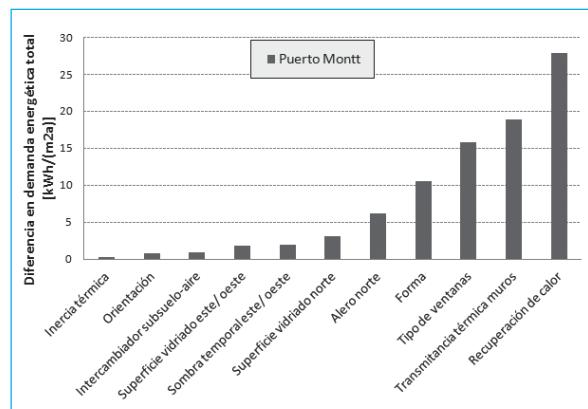
Puerto Montt: En la ilustración 6, se resume gráficamente la influencia de los factores con sus cambios de niveles en la demanda energética total, de refrigeración y de calefacción en la ciudad de Puerto Montt. Los factores que influyen en la demanda de calefacción son los más significativos al igual que en Concepción. La influencia en la demanda de refrigeración es casi cero, dado que en Puerto Montt, no es necesario climatizar en verano. La demanda energética total depende, por lo tanto, únicamente de la demanda energética para calefacción.

El factor cuya influencia frente a la mayor diferencia en la demanda energética es el sistema de ventilación con recuperación de calor. Contar con recuperación de calor, significa que se puede reducir la demanda energética en más de 25 kWh/(m²a). Bajando los valores U del muro de 0,5 W/(m²K) a menos o igual a 0,2 W/(m²K) significa una reducción de la demanda energética de 19 kWh/(m²a) y, utilizando ventanas de vidrio termo panel con una capa de baja emisividad y relleno de gas argón, se reduce la demanda energética en comparación a ventanas termo paneles comunes en 16 kWh/(m²a).

Considerando la demanda energética, necesaria para cumplir con el estándar Passivhaus, de aprox. 15 kWh/(m²a) en calefacción, son esenciales los aportes en

la reducción de la demanda de los parámetros nombrados anteriormente. Por lo tanto, no se logrará el estándar Passivhaus en Puerto Montt sin la incorporación de un sistema de ventilación con recuperación de calor, una buena aislación térmica y ventanas de una calidad superior.

Ilustración 6: Influencia de los factores investigados a la diferencia de la demanda energética total en Puerto Montt



Fuente: elaboración propia.

4. Discusión y recomendaciones

Anteriormente se mostró que casas construidas según el estándar "Passivhaus" tienen una reducción de la demanda energética de aproximadamente 80% en comparación a una casa construida según reglamentación térmica vigente en Chile. Se analizó la influencia de los diferentes factores del diseño en la demanda energética. Más adelante se formulan algunas recomendaciones generales para el diseño de casas Passivhaus en Santiago, Concepción y Puerto Montt o para climas similares, dado que se demostró que, en cada clima distinto, hay que aplicar estrategias diferentes para lograr el estándar.

Santiago: Un concepto general, para cumplir con el estándar "Passivhaus" es: para bajar la demanda energética en calefacción, se deben minimizar las pérdidas y maximizar las ganancias. Para el clima de la ciudad de Santiago, esta estrategia presenta un comportamiento contrario, dado que maximizar las ganancias solares presenta una alta posibilidad de provocar un sobrecalentamiento y un aumento de la demanda energética de refrigeración en verano.

Los casos que presentan una superficie vidriada al este y oeste del 15% del muro, muestran un mejor comportamiento que los casos con ventanas grandes con la misma orientación. Controlando las superficies vidriadas, baja considerablemente la demanda energética en refrigeración. Si la superficie de las ventanas al este y oeste es elevada, la única opción de lograr una demanda energética en refrigeración de un bajo nivel, es la incorporación de sistemas de sombra sobre las superficies vidriadas.

La segunda estrategia para lograr una demanda energética muy baja en Santiago, es minimizar las pérdidas de calor en invierno. Se puede observar que, con la incorporación de un sistema de ventilación con recuperación de calor, se logra fácilmente con una transmitancia térmica moderada de $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, una demanda energética promedio bajo los $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Por el contrario, para lograr estas demandas tan bajas sin un sistema de ventilación con recuperación de calor, es necesario la incorporación de mucha aislación térmica para obtener valores U más bajos de $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Las recomendaciones para la ciudad de Santiago son, en resumen:

1. Minimizar superficies vidriadas al este y oeste.
2. Incorporar elementos de sombra en verano.
3. Incorporar un sistema de ventilación con recuperación de calor.
4. Transmitancia térmica de los muros $U \leq 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, techumbre $U \leq 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, radier $U \leq 0,65 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Concepción: Como concepto general, se puede indicar que, maximizar las ganancias y minimizar las pérdidas para bajar la demanda energética en calefacción, es más factible de aplicar como estrategia en Concepción que en Santiago, dado que no hay un alto riesgo de sobrecalentamiento en verano. Esto significa, que la solución pasa por un buen diseño del edificio, en general, procurando medidas de ventanas adecuadas hacia las distintas orientaciones, las cuales bajan la demanda energética en calefacción y la incorporación de elementos de sombra para no provocar un sobrecalentamiento en verano.

En Concepción, generalmente no es factible lograr una demanda energética en calefacción bajo de $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, sin contar con un sistema de ventilación con recuperación de calor. Además, es recomendable tener una baja transmitancia térmica de la envolvente y de las ventanas termo paneles mejoradas. En resumen, las recomendaciones para la ciudad de Concepción son:

- Incorporación de un sistema de ventilación con recuperación de calor.

- Transmitancia térmica de los muros $U \leq 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, techumbre $U \leq 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, radier $U \leq 0,65 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
- Ventanas termo paneles mejoradas con valores $U < 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ y un factor solar $g > 0,6$.
- Incorporar elementos de sombra en verano.

Puerto Montt: El concepto de maximizar las ganancias y minimizar las pérdidas igualmente es válido en Puerto Montt, como en Concepción, pero con una magnitud mayor, dado que en Puerto Montt existe un riesgo muy bajo de sobrecalentamiento en verano. Sin embargo, para lograr una demanda energética tan baja como en Concepción, en Puerto Montt se requiere un mayor esfuerzo. Esto significa, en general, la implementación de un sistema de ventilación con recuperación de calor, el mejoramiento de la transmitancia térmica de la envolvente incluyendo las ventanas y un diseño arquitectónico compacto. Las recomendaciones para la ciudad de Puerto Montt son en resumen:

- Incorporación de un sistema de ventilación con recuperación de calor
- Transmitancia térmica de los muros $U \leq 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, techumbre $U \leq 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, radier $U \leq 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Ventanas termo paneles mejoradas con valores $U < 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ y un factor solar $g > 0,6$
- Diseño arquitectónico con forma compacta

Uno de los parámetros estudiados, muestra un comportamiento similar en las tres ciudades estudiadas, y se analiza a continuación. Este parámetro es la orientación de la fachada principal con respecto al norte. La pregunta investigada es: ¿Hay un cambio significativo en lograr el estándar Passivhaus y, en la demanda energética, si la fachada principal no tiene la orientación del 100% al norte? En el diseño ocurren estas situaciones frecuentemente, dado que el sitio, donde se pretende construir la casa, pocas veces cuenta con la orientación óptima. En el presente estudio se gira la casa desde el noroeste (315°), al norte (0°) hasta el nordeste (45°). El resultado es que un cambio de la orientación en el rango estudiado tiene una influencia casi nula con respecto a la demanda energética y al cumplimiento del estándar Passivhaus en las tres ciudades estudiadas. Esto significa, para el proceso de diseño, que el arquitecto tiene más flexibilidad de posicionar la casa en el sitio y no tiene que respetar la orientación hacia el norte al 100%.

5. Conclusiones

Se demostró que se puede ahorrar en el centro-sur de Chile, igual que en Europa central, con construcciones que cumplen con el estándar "Passivhaus" aproxi-

madamente un 80% de energía en climatización, en comparación a construcciones que cumplen con la reglamentación térmica vigente en Chile (MINVU 2006). Este estándar logrará una clasificación de eficiencia energética de A+++ en comparación a las clasificaciones de la eficiencia energética propuestas en el sistema de certificación energética de viviendas en Chile. Aparte de la posibilidad de bajar considerablemente la demanda energética con casas "Passivhaus", se aumenta el confort interior, dado que la temperatura superficial interior de la envolvente, en especial de las ventanas, es más alta. Se puede lograr el estándar, en comparación a Europa central, con medidas más moderadas como, por ejemplo con 10 cm de aislación térmica en los muros en Concepción en comparación a 30 cm aislación térmica en Múnich.

La tecnología para construir casas "Passivhaus", como alta aislación térmica, ventanas termo paneles Low-E con argón o los sistemas de ventilación con recuperación de calor ya son accesibles y existen en gran parte en el mercado nacional. Se pueden construir casas pasivas sin limitaciones en la materialidad, dado que el estándar "Passivhaus" es un estándar energético y no un sistema constructivo. También, la industria de la construcción, es capaz de lograr la calidad necesaria del estándar con sus exigencias altas, como por ejemplo, la alta hermeticidad. Es muy importante, para lograr esta calidad, la incorporación de todas las especialidades desde el comienzo del diseño, lo que hoy llamamos proceso de diseño integrado, descrito en (Miotto, García *et al.* 2011).

Sin duda las construcciones que logran el estándar "Passivhaus" tienen un costo de inversión inicial más alto que una construcción que solo cumple con la reglamentación térmica actual en Chile. Pero, por otro lado, estas construcciones tienen un costo de operación de un aproximadamente 80% más baja que una construcción tradicional. Con este ahorro en los costos de la operación, se recupera el costo inicial más alto durante la vida útil de la construcción. El sistema de ventilación de una casa pasiva, actúa igualmente como sistema de calefacción central, dado que climatiza cada recinto de la casa a través del flujo de aire. Con este sistema, se puede sustituir una calefacción central tradicional, lo cual significa que los costos no se aumentan, dado que un sistema de ventilación con recuperación de calor tiene un costo similar al de una calefacción central. La rentabilidad económica depende, por esta razón, al nivel económico de la vivienda con la cual se está comparando. Si es una vivienda pensada con calefacción central será rentable el estándar casa pasiva, pero en el caso de una vivienda social, será casi imposible mejorar la

vivienda al nivel del estándar, con los recursos económicos entregados hoy día. Sin duda, pensamos que los usuarios de viviendas sociales, podrían obtener el estándar, con todo lo que ello implica respecto de aumentar la calidad de vida y un aumento del confort interior y sin tener gastos elevados en energía, solo si se obtiene un subsidio adicional por este tipo de casas, como ocurre, por ejemplo en Alemania. En una etapa posterior de la investigación, se investigará con mayor profundidad la rentabilidad económica del estándar en el centro-sur del país.

La propuesta para el cumplimiento del estándar "Passivhaus" en Chile contiene generalmente las mismas obligaciones como en Europa central (Gantioler 2010). Los puntos clave son, entre otros:

- Demanda energética máxima para calefacción: 15 kWh/(m²a),
- Demanda energética máxima para refrigeración: 15 kWh/(m²a)
- Para edificios con calefacción y refrigeración por aire, se acepta como alternativa, también, previa comprobación, que es posible climatizar a la temperatura deseada con el flujo de aire sin utilizar recirculación.
- Nivel de hermeticidad, posiblemente cambiar de 0.6 a 1 ACH(50Pa)
- Un consumo de energía primaria para todos los sistemas (calefacción, refrigeración, ACS, electricidad, auxiliar...) no superior a 120 kWh/(m²a)
- Temperaturas superficiales interiores de la envolvente térmica durante invierno >17 °C

Para garantizar la calidad de las casas y del estándar "Passivhaus" se propone, la necesidad de certificar el estándar, a través de instituciones nacionales, como por ejemplo, las universidades o instituciones internacionales, como por ejemplo el Instituto de las casas pasivas en Darmstadt (Alemania). Solo así, el cliente o futuro usuario tendrá la certeza de que su casa, en realidad, logra un confort térmico alto con gastos en energía muy bajos.

6. Agradecimientos

Estos antecedentes han sido recopilados en el marco de un proyecto FONDEF D09I108: "Desarrollo e introducción del sistema de edificación pasiva en Chile" al cual están integrados los autores del artículo. Los antecedentes forman parte de tesis en desarrollo del autor Hatt. T del programa de Doctorado en Arquitectura y Urbanismo de la U. del Bío-Bío, Concepción, Chile.

Referencias

1. Miotto, U., R. García, *et al.* (2011). "Diseño Integrado para Viviendas Energéticamente Eficientes en Chile: Enhebrando Capacidades". Hábitat Sustentable Vol. 1, N° 1.
2. Feist, W. (2006) "Geschichte Passivhaus". 19.04.2010.
3. Espenberger, A. and S. Mekjian (2011). iPHA: Global denken, lokal handeln. 15 Internationale Passivhaustagung. W. Feist. Innsbruck, Passivhaus Institut Darmstadt. 15: 65-71.
4. Feist, W. (2005) "Passivhaus Definition". actualisiert: 16.09.2005.
5. Krick, B., W. Feist, *et al.* (2011). Funktionale Beschreibung von Passivhaeusern - eine klimaunabhaengige Definition. 15 Internationale Passivhaustagung. W. Feist. Innsbruck, Passivhaus Institut Darmstadt. 15: 569-574.
6. Gantioler, G. (2010). Manual para la certificación "Estándar Passivhaus". CERTIFICADO Estándar Passivhaus Dr. Wolfgang Feist, PASSIV HAUS INSTITUT Dr. Wolfgang Feist.
7. Feist, W., S. Peper, *et al.* (2001). CEPHEUS-Projectinformation No. 36, Final Technical Report. No. 36: 20.
8. Schnieders, J. and A. Hermelink (2006). "CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building". Energy Policy 34(2): 151-171.
9. Huenchunir, M. (2011). Bank building in Santiago, Chile. 15 Internationale Passivhaustagung. W. Feist. Innsbruck, Passivhaus Institut Darmstadt. 15: 265-270.
10. EnergyPlus (2010). EnergyPlus Version 6.0.0 Build 023. The Board of Trustees of the University of Illinois and The Regents of the University of California through Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Version 6.0.0 Build 023.
11. Crawley, D. B., J. W. Hand, *et al.* (2008). "Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs". Building and Environment 43(4): 661-673.
12. Wetter, M. (2009). GenOpt® Generic Optimization Program User Manual Version 3.0.0. Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley.
13. MINVU (2006). Manual de Aplicación reglamentación térmica MINVU ordenanza general de urbanismo y construcciones Artículo 4.1.10. Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU. Santiago de Chile.
14. Bustamante, W. G. (2008). Análisis y simulación de la demanda energética de calefacción en una vivienda tipo con soluciones de envolvente estructuradas en MSD y AraucoPly de Arauco. Santiago de Chile.
15. Bustamante, W., Y. Rozas, *et al.* (2009). Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social. Ministerio de Vivienda y Urbanismo División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional (MINVU) y Programa País de Eficiencia Energética (cne). Santiago de Chile.
16. Krämer, S. and G. Nordsieck (2009). Optimización del comportamiento térmico en vivienda social lo espejo II. Fomento de la Eficiencia Energética (CNE/GTZ). Santiago de Chile.