



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCION Y DISEÑO
DOCTORADO EN ARQUITECTURA Y URBANISMO**

**EL ESTÁNDAR "PASSIVHAUS" EN EL
CENTRO-SUR DE CHILE
UN ESTUDIO PARÁMETRICO MULTIFACTORIAL**

TESIS DOCTORAL

AUTOR:

TOBIAS HATT

Profesores Guías:

**Dr. Gerardo Saelzer Fuica
Prof. tit. Ricardo Hempel Holzapfel
Prof. tit. Kurt Schwaner**

CHILE, CONCEPCIÓN 2012



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCION Y DISEÑO
DOCTORADO EN ARQUITECTURA Y URBANISMO**

EL ESTÁNDAR "PASSIVHAUS" EN EL CENTRO-SUR DE CHILE

UN ESTUDIO PARÁMETRICO MULTIFACTORIAL

TESIS DOCTORAL

Autor:

Tobias Hatt

Profesores Guías:

**Dr. Gerardo Saelzer Fuica (Universidad del Bío-Bío) Chile.
Prof. tit. Ricardo Hempel Holzapfel (Universidad del Bío-Bío) Chile.
Prof. tit. Kurt Schwaner (Hochschule Biberach) Alemania.**

Miembros del Comité:

**Dr. Gerardo Saelzer Fuica (Universidad del Bío-Bío) Chile.
Dr. Rodrigo García Alvarado (Universidad del Bío-Bío) Chile.
Dra. Maureen Trebilcock Kelly (Universidad del Bío-Bío) Chile.
Prof. tit. Andreas Gerber (Hochschule Biberach) Alemania.
Dr. Flavio Celis D'Amico (Universidad de Alcalá) España.
Dr. Adelqui Fissore Schiappacasse (Universidad de Concepción) Chile.**

CHILE, CONCEPCIÓN 2012.

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que me han apoyado durante este tiempo, para lograr un trabajo que en un comienzo parecía tan difícil y en ocasiones imposible: mi Tesis Doctoral.

En primer lugar, agradezco a mis profesores guías, el Prof. Dr. Gerardo Saelzer Fuica y el Prof. Ricardo Hempel Holzapfel de la Universidad del Bío-Bío y el Prof. Kurt Schwaner de la Hochschule Biberach, que me han apoyado y guiado, por una parte, con su conocimiento científico y, por otra parte, con su paciencia, su dedicación personal y sobre todo, con el interés que han demostrado en mi trabajo. Ha sido un placer trabajar con ellos. Un agradecimiento especial para el Prof. Ricardo Hempel Holzapfel, director del Proyecto FONDEF D09I108: “Desarrollo e introducción del sistema de edificación pasiva en Chile”, por la oportunidad de haber podido desarrollar mi tesis en el marco de dicho proyecto.

Agradezco al Prof. Andreas Gerber de la Hochschule Biberach por su tiempo y sus consejos, sobre todo en la parte de las simulaciones térmicas.

Gracias a mi amiga Carolina González Molina por sus revisiones de mi español deficitario.

Sobre todo un gracias gigante a mis amigos, mi familia, en especial a mis padres Aloisia y Albert (vielen Dank) y a mi pareja Elena.

Contenido general

Resumen.. 9

Índice..... 15

**1 Introducción a la eficiencia energética, confort interior y al estándar
Passivhaus en Chile..... 26**

2 Determinación de la metodología y de los métodos para el estudio 66

3 Definición de los parámetros para el estudio multifactorial..... 92

**4 Análisis de los resultados del estudio paramétrico en relación al
desempeño energético..... 124**

5 Marco teórico para el análisis de rentabilidad..... 168

6 Resultados del análisis de rentabilidad 208

7 Síntesis, Conclusiones y Trabajos futuros..... 240

Listado de Ilustraciones 250

Listado de Tablas 259

Bibliografía..... 270

Anexos..... 281

Resumen

El ahorro de energía es un tema muy actual 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, siendo ambos productos de una edificación deficiente.

En la presente tesis doctoral, se demuestra que se puede ahorrar en el centro-sur de Chile con construcciones que cumplen con el estándar energético, llamado estándar Passivhaus, aproximadamente 80% de energía en climatización, en comparación con construcciones que sólo cumplen con la reglamentación térmica vigente en Chile. Este potencial ahorro energético, es el argumento más fuerte a favor del estándar, que manifiesta sus consecuencias positivas y sustentables, como la reducción del impacto ambiental y de las emisiones de CO², además de una mayor independencia energética. Junto con la posibilidad de bajar el consumo energético, se aumenta el confort interior, dado que se logra una temperatura interior confortable y estable y, una temperatura superficial interior de la envolvente más alta, especialmente de las ventanas, para evitar condensación superficial y crecimiento de moho. Además del confort térmico, se logra una alta calidad del aire, por su renovación constante a través de un sistema de ventilación.

Se demuestra, a través de un estudio paramétrico con simulaciones térmicas y análisis de costos del ciclo de vida, que en más de 20.000 casos de estudio, los valores límites para las demandas energéticas en refrigeración y calefacción, utilizados en el estándar Passivhaus en Europa central, son igualmente válidos para el centro-sur de Chile. Se determinaron las distintas configuraciones necesarias para cumplir con el estándar en tres ciudades del centro-sur de Chile.

Las tecnologías para construir casas Passivhaus, tales como, una aislación térmica alta, ventanas termo paneles Low-E con argón o, sistemas de ventilación con recuperación de calor, ya son accesibles en el mercado nacional. Sin duda, edificaciones que logran el estándar, tienen un costo de inversión inicial más alto que una construcción tradicional, pero, por otra parte, las casas Passivhaus tienen un costo de operación aproximado de un 80% más bajo que una vivienda tradicional. Se demuestra, que se recupera el costo inicial más alto, a través de este ahorro, durante 6 a 12 años. El estándar Passivhaus es, por lo tanto, en el centro-sur de Chile un estándar sustentable y a largo plazo una inversión rentable.

Palabras claves: *eficiencia energética, casas pasivas, estándar Passivhaus, confort interior, ahorro energético, sustentabilidad*

Abstract

Energy saving is a very current topic in Chile. There are two divergent realities in the construction sector: on the one hand there exists an inadequate indoor comfort and on the other hand high energy consumption. Both are products of a low building quality.

This thesis shows that it is possible to save about 80% of energy in space heating and cooling in the central-southern area of Chile with low energy buildings, those reach the so-called Passive House Standard. They are compared with buildings that meet the current Chilean building code. This energy-saving potential is the strongest argument in favor of the standard. It has a positive and lasting impact, such as the reduction of pollution and CO₂ emissions as well as greater independence from natural resources. It is shown that using this standard not only reduces the energy demand of buildings but also increases its conditions of internal comfort. Passive Houses are offering a convenient and consistent room temperature on one hand, and a higher surface temperature of the surrounding surfaces on the other hand. Especially windows have a higher surface temperature to avoid surface condensation and growth of mold. Besides the thermal comfort a high quality of the air inside the house is achieved by a constant renewal of air through a ventilation system.

More than 20.000 case studies are investigated through a parametric study with thermal simulations and life cycle cost analysis. It is demonstrated that the limits of cooling and heating energy demand used in the Passive House Standard in Central Europe, are equally valid for the central-southern area of Chile. Furthermore, various minimum requirements for the building envelope were established to achieve the Passive House Standard in three cities in the central-southern area of Chile.

Technologies to build Passive Houses, such as high thermal insulation, double glazing windows with Low-E coat and argon filling or ventilation systems with heat recovery are already available in the Chilean market. Certainly, buildings that achieve the standard have higher initial investment costs than traditional constructions. On the other hand, Passive Houses have an operating cost of approximately 80% lower than traditional ones. The initial investment can be recovered during a period of 6 to 12 years. It is shown, that the Passive House standard is a sustainable solution and in long term a profitable investment in the central-southern area of Chile.

Key words: *energy efficiency, Passive House Standard, Passivhaus, interior comfort, energy saving, sustainability*

Zusammenfassung

Energieeinsparung ist ein aktuelles Thema in Chile, auch im Immobiliensektor. Im Großteil der Gebäude herrscht entweder eine ungenügende thermische Behaglichkeit, oder es besteht ein hoher Energiebedarf, beides Ergebnisse einer unzureichenden Gebäudequalität.

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass man in Zentral-Süd-Chile mit Gebäuden, die den sogenannten „Passivhaus-Standard“ erfüllen, etwa 80% Energie für Klimatisierung einsparen kann, im Vergleich zu Gebäuden, die der aktuellen chilenischen Bauordnung entsprechen. Dieses Energieeinsparpotenzial ist das stärkste Argument zugunsten des Standards, mit seinen positiven und nachhaltigen Auswirkungen, wie der Verringerung der Umweltbelastung und der CO²-Emissionen, sowie eine größere Unabhängigkeit von natürlichen Ressourcen. Es wird gezeigt, dass neben der Reduzierung des Energieverbrauchs der Innenraumkomfort erhöht wird, da im Passivhaus, zum einen eine angenehme und gleichbleibende Raumtemperatur herrscht und zum anderen, eine höhere Oberflächentemperatur der Umschließungsflächen erreicht wird, insbesondere der Fenster, was sich in einer Verringerung des Kondensationsrisikos und der Schimmelbildung auswirkt. Neben der thermischen Behaglichkeit wird durch die ständige Lüfterneuerung mittels einer Lüftungsanlage, eine hohe Raumluftqualität erreicht.

Es wird anhand einer Parameterstudie, an mehr als 20.000 theoretischen Objekten mit Hilfe thermischer Gebäudesimulationen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen gezeigt, dass die Grenzwerte für Heiz- und Kühlenergiebedarf, welche für Passivhäuser in Mitteleuropa gelten, gleichermaßen für Zentral-Süd-Chile übernommen werden können. Des Weiteren wurden verschiedene Mindestanforderungen an die Gebäudehülle ermittelt, mit welchen der Passivhaus-Standard in drei Städten im südlichen Zentral-Chile erreicht werden kann.

Passivhäuser weisen, aufgrund zusätzlich benötigter Komponenten eine höhere Anfangsinvestition als herkömmliche Häuser auf. Diese Komponenten wie Dämmmaterial, Wärmeschutzverglasung oder Lüftungssysteme sind bereits am chilenischen Markt verfügbar. Die höhere Anfangsinvestition kann in einem Zeitraum von 6 bis 12 Jahren zurückgewonnen werden, da in Passivhäusern die Operationskosten, im Vergleich zu herkömmlichen Häusern, ca. 80% niedriger sind. Es wird gezeigt, dass der Passivhaus-Standard in Zentral-Süd-Chile eine nachhaltige Lösung und langfristig eine profitable Investition ist.

Schlagwörter: *Energieeffizienz, Passivhaus, Passivhaus-Standard, Innenraum-Komfort, Energieeinsparung, Nachhaltigkeit*

Índice

Resumen	9
Abstract... ..	11
Zusammenfassung	13
Índice.....	15
1 Introducción a la eficiencia energética, confort interior y al estándar Passivhaus en Chile.....	26
1.1 Eficiencia energética y confort interior en las edificaciones en Chile	26
1.1.1 El clima de Chile.....	26
1.1.2 La edificación como segunda piel: Confort térmico y bienestar de los habitantes.....	29
1.1.3 Confort interior actual en las edificaciones en Chile.....	31
1.1.4 Consumo y uso de energía para climatizar viviendas actualmente en Chile	34
1.2 Estándares energéticos, reglamentaciones y certificaciones	37
1.2.1 Normas y la reglamentación térmica en Chile.....	37
1.2.2 Reglamentación térmica	39
1.2.3 Estándares energéticos en general y estándares de bajo consumo energético.....	42
1.3 El estándar Passivhaus: Confort interior alto, consumo energético bajísimo y económicamente rentable.....	44
1.3.1 La historia o la invención del estándar Passivhaus.....	44
1.3.2 Definición del estándar Passivhaus en climas europeos según el instituto “Passivhausinstitut Darmstadt”	46
1.3.3 Desarrollo del estándar Passivhaus a nivel mundial	51
1.4 El estándar Passivhaus en Chile	55
1.4.1 Estado de arte del estándar Passivhaus en Chile.....	55
1.4.2 Consideraciones generales	57
1.4.3 Resumen de las condiciones bordes	63

2	Determinación de la metodología y de los métodos para el estudio	66
2.1	Determinación de la metodología	66
2.1.1	Objetivos propuestos a lograr con el estudio	66
2.1.2	Metodología propuesta para lograr los objetivos.....	67
2.1.3	Definición del cumplimiento del estándar Passivhaus.....	69
2.2	Métodos para predecir el comportamiento energético-térmico de una edificación	70
2.2.1	Simulaciones térmicas dinámicas y métodos simplificados.....	70
2.2.2	Software de cálculo de casas pasivas (PHPP) como método simplificado especialmente para la planificación de edificaciones Passivhaus	71
2.2.3	El software EnergyPlus como ejemplo de un programa de simulaciones térmicas dinámicas.....	74
2.3	Determinación del método a utilizar para la predicción del comportamiento energético-térmico.....	76
2.3.1	Requisitos generales con los cuales debe cumplir el método	76
2.3.2	Datos meteorológicos para la realización de los cálculos	77
2.3.3	Comparación de los resultados calculados con el PHPP y EnergyPlus para un caso ubicado en Múnich	78
2.3.4	Comparación de los resultados calculados con PHPP y EnergyPlus para un caso ubicado en tres climas diferentes de Chile	82
2.3.5	Determinación del método para la realización del estudio paramétrico.....	85
2.4	Automatización de las simulaciones para el estudio paramétrico.....	86
2.4.1	Automatización de simulaciones térmicas en general.....	86
2.4.2	Descripción del software de automatización utilizado en el estudio	87
2.4.3	Definición del proceso del estudio paramétrico multifactorial	88
3	Definición de los parámetros para el estudio multifactorial.....	92
3.1	Determinación de los parámetros a variar en el estudio que influyen en el comportamiento energético-térmico.....	92
3.1.1	Parámetros que influyen en el comportamiento energético-térmico de una edificación en general.....	92

3.1.2	Parámetros definidos, para analizar su influencia en el comportamiento energético-térmico de los casos de estudio.....	93
3.1.3	Exigencias generales en la calidad térmica de la envolvente para garantizar confort térmico y para evitar riesgos para la salud por crecimiento de moho.....	96
3.2	Determinación de los niveles de los parámetros a variar para los casos de estudio.....	100
3.2.1	Clima / Ubicación.....	100
3.2.2	Orientación.....	101
3.2.3	Geometría / Volumen / Factor de forma (Se/V).....	102
3.2.4	Superficie vidriada de la fachada al este igual que al oeste.....	104
3.2.5	Superficie vidriada de la fachada norte.....	105
3.2.6	Alero o balcón como elemento de protección solar para la fachada norte.....	106
3.2.7	Elementos de protección solar en verano de las superficies vidriadas en las fachadas este y oeste.....	107
3.2.8	Tipo de los elementos vidriados.....	108
3.2.9	Transmitancia térmica de elementos opacos de la envolvente.....	110
3.2.10	Inercia térmica de la construcción.....	111
3.2.11	Sistema de ventilación con o sin recuperación de calor.....	112
3.2.12	Intercambiador de calor subsuelo-aire.....	114
3.3	Determinación de los niveles de los parámetros para los casos de referencia según reglamentación térmica.....	115
3.3.1	Ubicación, orientación, factor forma, superficie vidriada al oeste este norte, protección solar para la fachada norte y protección solar para la fachada este y oeste para los casos de referencia.....	115
3.3.2	Tipos de elementos vidriados de los casos de referencia.....	116
3.3.3	Transmitancia térmica de los elementos opacos de la envolvente, e inercia térmica de la construcción de los casos de referencia.....	118
3.3.4	Sistema de ventilación con o sin recuperación de calor e intercambiador de calor subsuelo-aire para los casos de referencia.....	119
3.4	Resumen de los parámetros y sus distintos niveles determinados para el estudio.....	120

4	Análisis de los resultados del estudio paramétrico en relación al desempeño energético.....	124
4.1	Clasificación en los casos que lograron cumplir con el estándar Passivhaus y en los casos que no lograron cumplir con el estándar.....	124
4.1.1	Definición y clasificación.....	124
4.1.2	Resumen de la clasificación.....	125
4.1.3	Influencia de los parámetros y sus niveles de clasificación en Santiago.....	130
4.1.4	Influencia de los parámetros y sus niveles de clasificación en Concepción.....	131
4.1.5	Influencia de los parámetros y sus niveles a la clasificación en Puerto Montt..	132
4.2	Análisis de la demanda energética de todos los casos de estudio.....	133
4.2.1	Análisis global de la demanda energética de todos los casos de estudio y comparación entre las tres ciudades analizadas.....	133
4.2.2	Análisis de la demanda energética de todos los casos de estudio para Santiago.....	142
4.2.3	Análisis de la demanda energética de todos los casos de estudio para Concepción.....	144
4.2.4	Análisis de la demanda energética de todos los casos de estudio para Puerto Montt.....	146
4.3	Análisis comparativo de la demanda energética de los casos que lograron el estándar Passivhaus versus los casos de referencia.....	149
4.3.1	Diferencia entre casas pasivas y casos de referencia en la demanda energética total.....	149
4.3.2	Diferencia entre casas pasivas y casos de referencia en la demanda energética para calefacción y refrigeración por separado.....	152
4.4	Análisis de los casos los cuales muestran la demanda energética más alta y más baja.....	153
4.4.1	Casos de estudio cuya demanda energética en calefacción y refrigeración es más baja.....	153
4.4.2	Casos de estudio cuya demanda energética en calefacción y refrigeración es más elevada.....	155

4.5	Análisis de la reducción de la demanda energética del sistema de ventilación con recuperación de calor versus el consumo energético del mismo sistema	157
4.6	Recomendaciones para el diseño de casas de baja demanda energética en Santiago, Concepción y Puerto Montt, basadas en el análisis de la clasificación y del consumo energético.....	159
4.6.1	Recomendaciones generales basadas en el análisis de la clasificación y del consumo energético y metodología utilizada	159
4.6.2	Recomendaciones generales para el diseño de casas de baja demanda energética en Santiago.....	161
4.6.3	Recomendaciones generales para el diseño de casas de baja demanda energética en Concepción	163
4.6.4	Recomendaciones generales para el diseño de casas de baja demanda energética en Puerto Montt	164
5	Marco teórico para el análisis de rentabilidad.....	168
5.1	Metodología del análisis de rentabilidad	168
5.1.1	Rentabilidad de inversiones en estándares de bajo consumo energético	168
5.1.2	Diferentes métodos para determinar la rentabilidad de una inversión.....	172
5.1.3	Método usado en el presente estudio de rentabilidad.....	176
5.2	Determinación de la diferencia en costos de inversión entre los casos de estudio y los casos de referencia (dIC).....	181
5.2.1	Condiciones límites para la determinación de la diferencia en costos de construcción	181
5.2.2	Determinación de la diferencia en costos de construcción entre los casos de estudio y los casos de referencia.....	183
5.2.3	Determinación de la diferencia en costos de los equipos de climatización entre los casos de estudio y los casos de referencia	185
5.2.4	Determinación de la diferencia en costos generales entre los casos de estudio y los casos de referencia.....	187
5.3	Determinación de la diferencia en costos de operación entre los casos de estudio y los casos de referencia (dOC)	188

5.3.1	Condiciones límites de la determinación de la diferencia en costos de operación.....	188
5.3.2	Determinación de la diferencia en costos de operación en energía para refrigeración y calefacción entre los casos de estudio y los casos de referencia	196
5.3.3	Determinación de la diferencia en costos de operación de energía auxiliar entre los casos de estudio y los casos de referencia	201
5.3.4	Determinación de la diferencia en costos de operación en mantención entre los casos de estudio y los casos de referencia	204
5.4	Determinación de la diferencia en costos de reemplazo durante la vida útil entre los casos de estudio y los casos de referencia (dRC).....	204
5.4.1	Condiciones borde de la determinación de la diferencia en costos de reemplazo.....	204
5.4.2	Determinación de la diferencia en costos de reemplazo entre los casos de estudio y los casos de referencia.....	204
5.5	Determinación de la diferencia de los costos del ciclo de vida entre los casos de estudio y los casos de referencia (dLCC)	205
6	Resultados del análisis de rentabilidad	208
6.1	Diferencia en los costos de inversión dIC entre edificación Passivhaus y caso de referencia	208
6.1.1	Diferencia en los costos de inversión (dIC) entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia.....	208
6.1.2	Distribución de la diferencia de los costos de construcción de sus distintos componentes	211
6.2	Diferencia en costos de operación dOC entre edificación Passivhaus y caso de referencia.....	212
6.2.1	Costos de operación capitalizados y diferencia en los costos de operación ...	212
6.2.2	Distribución de los costos de operación anual desglosados por el uso final ...	215
6.3	Costos del ciclo de vida dLCC entre edificación Passivhaus y caso de referencia	216

6.3.1	Diferencia en los costos del ciclo de vida entre edificación Passivhaus y caso de referencia	216
6.3.2	Influencia de los diferentes niveles de los parámetros en la diferencia de los costos del ciclo de vida de todos los casos de estudio	220
6.4	Periodo de recuperación, costos anuales, casos altamente rentables y análisis de la sensibilidad	227
6.4.1	Periodo de recuperación de la inversión en una edificación Passivhaus en comparación al caso de referencia	227
6.4.2	Diferencia en los costos anuales para el usuario entre edificación Passivhaus y caso de referencia con financiamiento a través de un crédito hipotecario.....	230
6.4.3	Los casos con la mayor rentabilidad y sus configuraciones respectivas	231
6.4.4	Análisis de la sensibilidad al cambio del porcentaje del aumento del precio de la energía	233
6.4.5	Análisis de la sensibilidad al cambio del sistema de calefacción de los casos de referencia (RT)	235
7	Síntesis, Conclusiones y Trabajos futuros.....	240
7.1	Síntesis de los resultados del estudio paramétrico con respecto a los objetivos propuestos.....	240
7.1.1	Síntesis de los resultados con respecto a los objetivos propuestos relacionados con el comportamiento energético/térmico del estándar Passivhaus.....	240
7.1.2	Síntesis de los resultados con respecto a los objetivos propuestos relacionados con la rentabilidad del estándar Passivhaus	242
7.2	Conclusiones.....	243
7.2.1	Propuesta de una definición de los criterios del estándar Passivhaus para el centro-sur de Chile	243
7.2.2	Consideraciones y conclusiones generales	244
7.3	Fortalezas y debilidades del trabajo realizado	247
7.4	Trabajos futuros, líneas de investigación.....	247

Listado de Ilustraciones	250
Listado de Tablas.....	259
Bibliografía.....	270
Anexos.....	281
A	Anexo A: Información adicional acerca de la definición de los parámetros 282
A.1	Determinación de la composición de los elementos constructivos y de los espesores de la aislación térmica 282
A.2	Determinación del tipo de vidrio de los casos de referencia según reglamentación térmica 284
A.3	Transmitancia térmica de los elementos opacos de la envolvente e inercia térmica de la construcción de los casos de referencia 286
B	Anexo B: Información adicional acerca de los resultados del análisis térmico por parámetro y nivel 288
B.1	Resumen de la demanda energética de todos los casos por parámetro y nivel en Santiago 288
B.2	Resumen de la demanda energética de todos los casos por parámetro y nivel en Concepción 291
B.3	Resumen de la demanda energética de todos los casos por parámetro y nivel en Puerto Montt..... 294
B.4	Resumen de la demanda energética total para los casos que cumplieron el estándar Passivhaus por parámetro y nivel 297
C	ANEXO C: Información adicional del análisis de rentabilidad del estándar Passivhaus en Chile 302
C.1	Precios unitarios 302
C.2	Diferencia en los costos de inversión dIC e influencia de los parámetros y sus niveles..... 304

C.3	Diferencia en los costos de operación dOC.....	307
C.4	Diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC	310
C.5	Periodo de recuperación de la inversión en una edificación Passivhaus e influencia de diferentes niveles de los parámetros.....	312
C.6	Diferencia en los costos anuales para el usuario entre edificación Passivhaus y caso de referencia	314
C.7	Los casos con la mayor rentabilidad con sus configuraciones	315
C.8	Análisis de la sensibilidad al cambio del porcentaje del aumento del precio de la energía	317
C.9	Análisis de la sensibilidad al cambio del sistema de calefacción en el caso de referencia (RT)	318

CAPÍTULO

1.

INTRODUCCIÓN A LA EFICIENCIA ENERGÉTICA,
CONFORT INTERIOR Y AL ESTÁNDAR
PASSIVHAUS EN CHILE

1 Introducción a la eficiencia energética, confort interior y al estándar Passivhaus en Chile

1.1 Eficiencia energética y confort interior en las edificaciones en Chile

1.1.1 El clima de Chile

Una de las características geográficas de Chile es que abarca una infinidad de zonas climáticas diferentes, desde climas casi polares hasta climas desérticos. El invierno y el verano en el norte son relativamente suaves, variando sus temperaturas entre 15° a 20° C, con variaciones relativamente pequeñas entre las estaciones anuales. La lluvia casi se desconoce, ya que, es una de las zonas más secas del mundo. En la zona Central, las diferencias de temperaturas anuales son más marcadas, alcanzando en verano un promedio de 28° C y en invierno de 14° C. La lluvia se concentra en invierno pero, cae sólo entre junio y agosto y puntualmente en mayo y septiembre, por lo tanto, hay durante casi dos tercios del año una absoluta sequía. Hacia el sur del país aumentan las lluvias en forma significativa llegando a su máxima intensidad en el mes de junio. Las temperaturas en verano fluctúan alrededor de los 20° C y en invierno entre los 5° y los 12° C.

Estos datos, bastante generales, muestran grandes variaciones dentro de una misma región y en una misma latitud, porque prácticamente a lo largo de todo el país ocurren diferencias importantes entre el clima de la costa con nubes frecuentes, del valle central o eje central del país, la pre cordillera y el clima de la alta cordillera.

Se muestra en la tabla 1-1, la tendencia de los factores climatológicos a lo largo y ancho de Chile según (Bustamante et al., 2009).

Tabla 1-1: Tendencia de los factores climatológicos a lo largo y ancho de Chile (Bustamante, et al., 2009).

	Factores Climatológicos	
	Incrementan	Disminuyen
De norte a sur	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitaciones • Humedad del Aire • N° de meses de invierno • Nubosidad • Vegetación 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura del Aire • Radiación Solar • Altura Solar
De oeste a este	<ul style="list-style-type: none"> • Oscilación diaria de T° • N° de horas de sol • Radiación solar 	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad del Aire • Nubosidad • Presión Atmosférica

Para comparar y clasificar zonas con climas distintos, existen varios métodos. Uno de ellos es el método de los grados-día, el cual se aplicó en la reglamentación térmica RT (MINVU, 2006) para la clasificación de zonas térmicas en Chile. La definición de los grados-día es según RT: en un período de un día, la diferencia entre la temperatura fijada como "base", y la media diaria de las temperaturas bajo la temperatura de base, igualando a la "base" aquellas superiores a ésta. Dependiendo del período de tiempo utilizado, se puede hablar de grados-día, grados-hora, grados-año.

El grado-día es la medida de la cantidad de frío (o calor) en un determinado periodo de tiempo y, como consecuencia, la cantidad de energía que se necesita para calentar (o enfriar) un edificio hasta una temperatura predeterminada. Los grados-día pueden ayudar a los diseñadores y consumidores a comparar el consumo energético por mes o año. La temperatura base a elegir para la determinación de los grados-días depende altamente de la calidad térmica de la construcción.

En el caso de la zonificación térmica de la RT, para la estimación de los grado-día se tomó como base de temperatura interior 15°C, bajo el supuesto de que lo que resta para alcanzar un confort de 18 a 20°C es aportado por las ganancias internas (personas, electrodomésticos, iluminación artificial y otros) y las ganancias solares (Bustamante, et al., 2009). Para esta zonificación se determinaron grados-día anuales. La tabla 1-2, muestra las zonas térmicas con su respectivo rango de grado-día de calefacción en base a 15°C y como ejemplo una ciudad por zona. Para comparar los grados días con algunas ciudades de Europa central se muestra igualmente Múnich (Alemania), Roma (Italia) y Madrid (España).

Tabla 1-2: Grados-día anuales según zona térmica RT (MINVU, 2006).

Zona térmica	Grado día (anual base 15°)	Ciudad ejemplo
1	≤ 500	Arica
2	> 500 - ≤ 750	Valparaíso
3	> 750 - ≤ 1000	Santiago
4	> 1000 - ≤ 1250	Concepción
5	> 1250 - ≤ 1500	Temuco
6	> 1500 - ≤ 2000	Puerto Montt
7	> 2000	Punta Arenas
	~2500	Múnich (Alemania)
	~1000	Roma (Italia)
	~1400	Madrid (España)

Capítulo 1.

Se puede observar, que el clima en Chile, clasificado con el concepto de grados-día, en muchas partes, es menos severo, como por ejemplo, que el clima de Alemania. Santiago presenta, aproximadamente, la misma cantidad de grados-día que Roma en Italia y los grados-día entre Concepción y Temuco presentan valores iguales que la ciudad de Madrid en España.

A parte de la temperatura exterior, la cual se puede definir por el concepto de los grados-día, existe otro parámetro ambiental importante, que influye sobre el clima interior de una edificación y la cantidad de energía que se necesita para calentar o enfriar. Este parámetro es la radiación solar que recibe el lugar. La cantidad de radiación solar, depende de la ubicación global del lugar en el planeta y otros factores como la nubosidad.

En la ilustración 1-1, se muestran las diferencias de la radiación solar recibida en el mundo. Se puede observar que, sobre todo, el norte de Chile es un lugar privilegiado por la radiación solar recibida durante el año. En el norte de Chile la radiación solar alcanza un valor sobre los 2.200 kWh/m²a y baja en el extremo sur de Chile hasta menos de 900 kWh/m²a. En Santiago la irradiación solar anual es de aprox. 1.700 kWh/m²a, en Concepción de aprox. 1.500 kWh/m²a, en Puerto Montt de aprox. 1.200 kWh/m²a. En comparación, en Alemania es de aproximadamente 1.000 kWh/m²a o sea un tercio menor que Concepción.

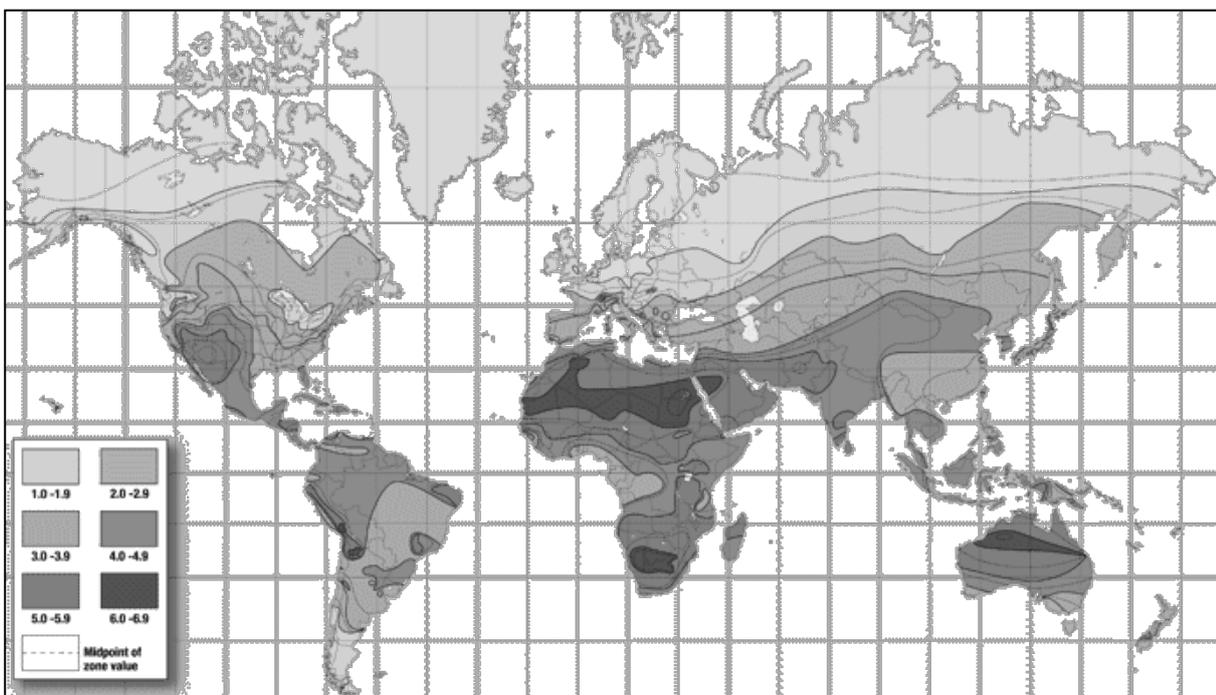


Ilustración 1-1: Mapa de radiación solar en kWh/m²d (Fuente: http://www.ayre.com.mx/tecnosolar/energia_solar.html).

Se concluye, que la zona centro-sur de Chile, en general, no presenta temperaturas muy severas y también, recibe una buena cantidad de radiación solar durante el año, en comparación a otros lugares del mundo.

1.1.2 La edificación como segunda piel: Confort térmico y bienestar de los habitantes

En el punto anterior, se mostró, que existen diferentes condiciones climáticas que interactúan con el ser humano y con sus edificaciones. “Uno de los propósitos históricos fundamentales de la construcción, particularmente de las viviendas, es proveer de adecuadas, estables y permanentes condiciones de habitabilidad a sus habitantes, con prioridad en el confort higrotérmico, requerimiento básico e imprescindible para la actividad humana” (MINVU, 2006).

La sensación de confort térmico de una persona es, de acuerdo a (Heidt, 2006), dependiente de las condiciones, en las cuales se establece un equilibrio térmico entre el cuerpo humano y su entorno. La sensación térmica depende de los siguientes parámetros:

- Factores físicos:
 - Temperatura del aire.
 - Temperatura superficial de los elementos del entorno.
 - Humedad relativa del aire.
 - Movimiento del aire cerca de la piel de la persona.
 - Aislación térmica de la vestimenta de las personas.
- Factores fisiológicos:
 - Peso y tamaño de las personas.
 - Generación de calor del mismo cuerpo humano (metabolismo).

Se entiende por confort térmico, la sensación de agrado de una persona en un espacio interior. No es posible establecer una condición universal sobre los valores que deben cumplirse para lograr este confort térmico, ya que, cada persona tiene una manera diferente de sentir las condiciones climáticas de un espacio interior. Por lo tanto, siempre puede haber un porcentaje de personas disconformes. Por este motivo, se define en la norma (EN ISO 7730, 1995) como un “clima interior aceptable” a un espacio en el que el 80% de las personas se encuentran confortables y aceptan las condiciones higrotérmicas de ese espacio. En forma similar lo establece la (ASHRAE 55, 2003) que sintetiza por medio de una puntuación el ámbito que comprende la sensación de confort. Ambas apreciaciones se basan en los estudios realizados por Ole Fanger, entre otros (Fanger, 1970).

El cuerpo humano regula la respiración, la circulación sanguínea, la temperatura de la piel, y la transpiración de tal manera que, según las condiciones del ambiente del entorno, el balance entre las pérdidas de calor y las ganancias se equilibren. Confort o discomfort se puede medir según (ASHRAE 55, 2003; EN ISO 7730, 1995) por medio del índice PMV (Predicted mean vote) en un rango entre -3 y +3 como se muestra en la tabla 1-3. Por medio del índice PMV es posible establecer el porcentaje de los disconformes con las condiciones del clima interior (PPD, predicted percentage of dissatisfied).

Tabla 1-3: Escala internacional para la evaluación del confort térmico en verano e invierno (según ISO 7730 y ASHRAE 55).

ASHRAE/ ISO 7730	Bedford scale	PMV Numerical equivalent
hot	much too hot	+3/7
warm	too hot	+2/6
slightly warm	comfortably warm	+1/5
neutral	comfortably	0/4
slightly cool	comfortably cool	-1/3
cool	too cool	-2/2
cold	much too cool	-3/1

Como observación, se puede tener en cuenta, que desde el año 1970 se encuentran en la literatura criterios de confort de la gama dinámica. Estos dependen, en contraste con el PPD y PMV, solamente de la temperatura exterior y no a todos los parámetros descritos anteriormente.

Sin embargo, los dos autores Schnieders (Schnieders, 2009) y Feist (Feist et al., 2005) llegan a la conclusión que, esta evaluación de confort dinámico se puede utilizar sólo para el caso de verano. Incluso, en este punto, hay controversia, ya que, el resultado es para una temperatura externa de 30° C, una temperatura aceptada interna de 29° C con una aceptación del 90%. En comparación con los otros métodos, se cree que es un valor significativamente alto. De acuerdo a Feist, la eficiencia energética no se debe lograr con un renuncio a la comodidad, sino a través de una construcción mejorada.

En conclusión, se observa, que existe una cantidad apreciable de literatura que exponen diferentes modelos de confort y que toman en cuenta las múltiples variables. Un estudio detallado de las diferencias entre los distintos modelos se encuentran en (Schnieders, 2009). En el escrito se analizan con más detalles, las diferentes variables. Como resultado,

Schnieders, concluye sobre las condiciones de confort que deben tener viviendas en climas mediterráneos en el sur-oeste de Europa. Estos climas poseen, como mencionado anteriormente, condiciones climáticas similares a las del centro-sur de Chile.

La definición del ámbito de confort para viviendas en climas mediterráneos está basada en el cumplimiento de las siguientes condiciones según (Schnieders, 2009) (Krick et al., 2011) y (Heidt, 2006). Cumpliendo con estas condiciones, se encuentra generalmente dentro del rango del PMV ± 1 . Estas condiciones de confort se aplican en el marco del presente estudio.

- Mantención de una temperatura mínima interior en invierno de 20°C.
- Mantención de una temperatura máxima interior en verano de 26°C (Krick, et al., 2011). Si la temperatura exterior supera los 32° C, la temperatura interior tiene que estar mínimo 6° C más baja de la exterior.
- La humedad relativa no debe ser superior al 70%.
- La humedad relativa no debe ser inferior al 30%. Se tiene previsto la instalación de equipos de humidificación, sólo si las humedades relativas son bajas en un largo periodo.
- Velocidad del aire $v < 0,1\text{m/s}$ (Krick, et al., 2011). Preferentemente con un sistema de ventilación mecánica, lo cual garantiza la calidad del aire. Las velocidades bajas del aire de estos sistemas no deben implicar una disminución del confort interno. Si se pretende aplicar una ventilación natural en invierno, hay que prevenir el riesgo de velocidades altas del aire. Se debe lograr una envolvente altamente hermética, para que no se produzca una corriente de aire por infiltraciones indeseadas.
- La temperatura superficial que irradia la envolvente debe ser similar a la temperatura del aire interior. La gradiente vertical de la temperatura en un espacio interior, según (Heidt, 2006), debe ser relativamente pequeña. (Gradiente vertical: máximo aproximadamente 1 °C/m; asimetría de la radiación $< 2.5^\circ\text{C}$).

1.1.3 Confort interior actual en las edificaciones en Chile

La situación del clima interior en las viviendas en Chile, según lo investigado por Campos (Campos, 2008) en su estudio: “Determinación de línea base anual para la evaluación de la inversión en eficiencia energética en el sector residencial invierno 2007 - Verano 2008”, tiene dos lados extremos. Por una parte, se muestran las viviendas de los sectores socioeconómicos medio-bajo, con un clima interior poco agradable, húmedo y con problemas de crecimiento de moho. Según él, la temperatura de las viviendas en invierno, es en promedio, según las muestras investigadas, de 15.7°C y la percepción de excesivo calor en verano en una vivienda es de 69.8%. En cambio, en el sector opuesto, el consumo de energía para

ambas temporadas (invierno /verano) resulta ser excesiva. En el sector socioeconómico medio-alto, las casas consumen una gran parte de la energía residencial en Chile, para calefacción, refrigeración, agua caliente y luz. Los gastos en calefacción llegan, para Santiago y Concepción, hasta los \$200.000 mensuales.

Campos realizó encuestas en los habitantes sobre el confort de sus viviendas y un monitoreo de las condiciones higrotérmicas de las viviendas. En una comparación de los resultados, él llegó a las siguientes conclusiones, para el invierno: “Hay una estrecha correlación entre la evaluación de percepción térmica y la temperatura efectiva, en la encuesta de Invierno - las viviendas con menor temperatura efectiva son las peores evaluadas por los habitantes y esto va mejorando en relación al incremento de la temperatura efectiva - por lo cual es posible señalar que los habitantes son sensibles a las diferencias de temperaturas”.

En la ilustración 1-2, se pueden observar los tramos de la temperatura operativa, la cual es el promedio entre la temperatura del aire y la temperatura de la envolvente. La temperatura operativa de los casos investigados no alcanza los 20°C del confort descrito anteriormente en el 94% del total de los casos. El 60% de las casas, en total, y el 95% de las casas en Concepción no superan, ni siquiera, los 15°C en invierno.

Estos resultados muestran con claridad, que existe un déficit en el confort interior en invierno, en las viviendas estudiadas en Chile.

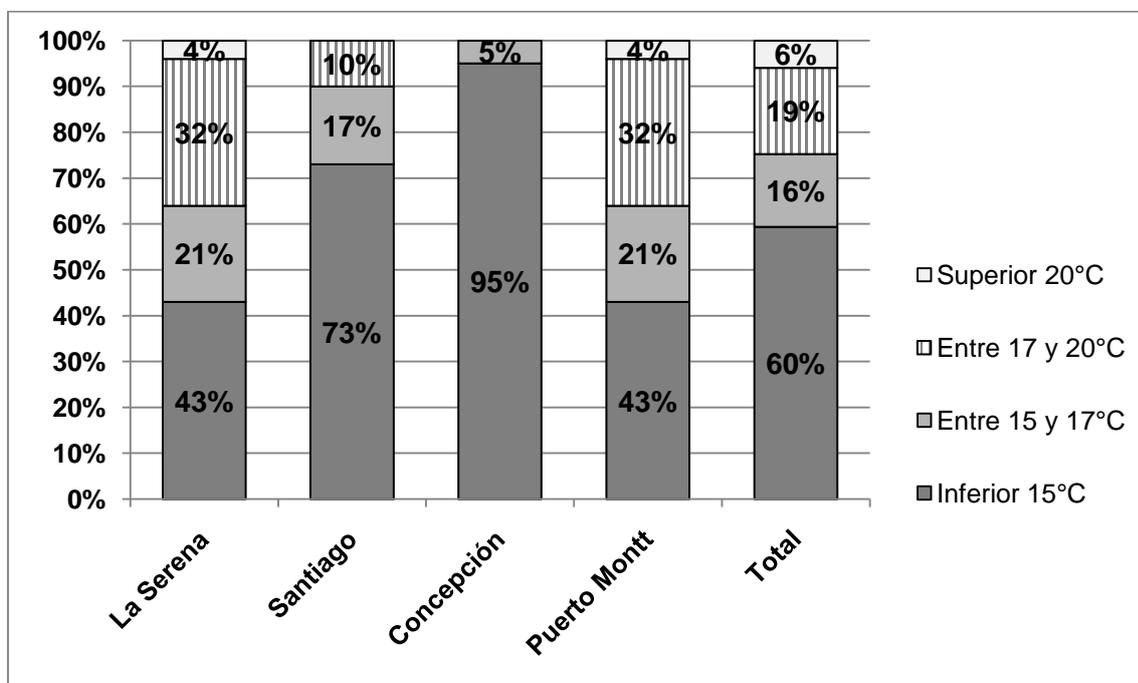


Ilustración 1-2: Tramos de temperatura operativa medida en las viviendas por ciudad en invierno (Campos, 2008).

Campos, llega con una comparación de los resultados a las siguientes conclusiones sobre el confort térmico en verano: “Se visualiza una correlación globalmente positiva entre la evaluación de percepción térmica y la temperatura efectiva, en tanto las viviendas con mayor temperatura efectiva son las viviendas evaluadas como “más calurosas” por los habitantes. Sin embargo, hay que señalar, que esta correlación es mucho menos estrecha que la correlación que se había observado para la percepción del frío durante las encuestas de invierno”.

En la ilustración 1-3, se pueden observar los tramos de temperatura operativa de los casos estudiados en verano. Considerando una temperatura inferior a los 26°C, como descrito en el punto anterior, como temperatura de confort, se puede observar que, aproximadamente la mitad de los casos, muestran un riesgo de sobrecalentamiento en verano. En la ciudad de Santiago, este riesgo es el más elevado de todas las ubicaciones estudiadas.

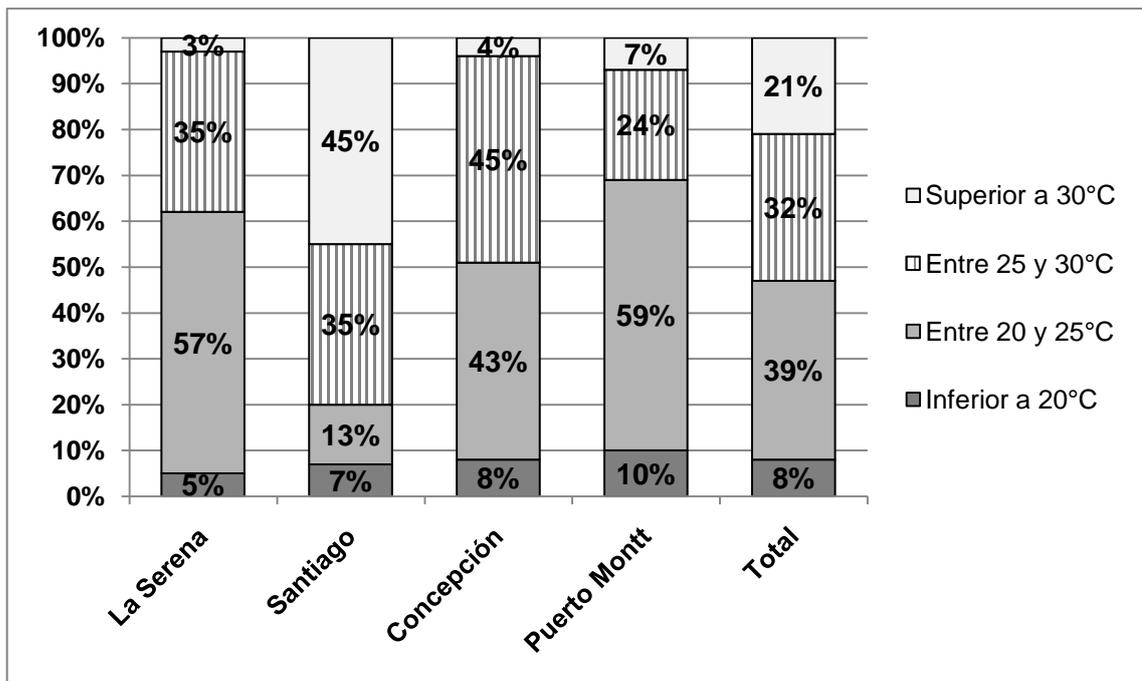


Ilustración 1-3: Tramos de temperatura operativa medida en las viviendas por ciudad en verano (Campos, 2008).

Se concluye, que en las viviendas estudiadas en Chile, existe un cierto riesgo de sobrecalentamiento en verano, lo que resulta en un confort térmico inadecuado. A través de una comparación de la situación de invierno y verano, se observa, que el déficit en el confort térmico en las viviendas existentes, es mucho más elevado en invierno, que en verano.

1.1.4 Consumo y uso de energía para climatizar viviendas actualmente en Chile

Hoy, es necesario, no sólo alcanzar los parámetros de confort requeridos, sino lograrlos con el menor uso de energía no renovable posible, aprovechando la energía solar en sus diversas fases y/o utilizando energía renovable si es necesario (MINVU, 2006). En esta perspectiva, desde hace más de treinta años, todos los países desarrollados, han establecido estrictas y progresivas regulaciones sobre la demanda de energía de las edificaciones, como también sobre el comportamiento de los componentes de la envolvente de las viviendas y edificios, la calidad del aire interior, la eficiencia de los equipos de calefacción, etc., llegando hoy a la certificación obligatoria respecto de la demanda de energía máxima de las edificaciones -expresada en kWh/m²año- incorporando un lenguaje relevante en términos técnicos y además, manejable y útil para toda la población. De manera paralela a la regulación, en diversos países han surgido iniciativas públicas y privadas, que no sólo han logrado disminuir significativamente la demanda de energía por bajo las exigencias reglamentarias – en cuatro y cinco veces – sino, hoy, se observan edificios que aportan energía renovable a la red.

En la tabla 1-4, se puede observar, que Chile depende altamente de la importación de energía. Esto significa, una dependencia económica importante a nivel nacional y además, genera una dependencia política de los países que exportan energía.

Tabla 1-4: Dependencia energética del año 2008 en Chile en Teracalorías (Comisión Nacional de Energía, 2008).

	Año 2008	Porcentaje
Nacional	115.392	32%
Importado	243.409	68%
Total Consumo Neto	358.801	100%

Históricamente, los esfuerzos del gobierno chileno, para promover la eficiencia energética, no han sido una prioridad, ni han formado parte de las políticas de estado (Asia-Pacific Economic-Cooperation, 2009). Sin embargo, el escenario cambió en 2005, cuando el gobierno comenzó a ocupar un papel de liderazgo en la promoción y desarrollo de la eficiencia energética. Esto se ha reflejado en la inclusión de la eficiencia energética como uno de los elementos centrales de la política energética del gobierno, y se demostró con la creación y fuerte respaldo del Programa País de Eficiencia Energética (PPEE).

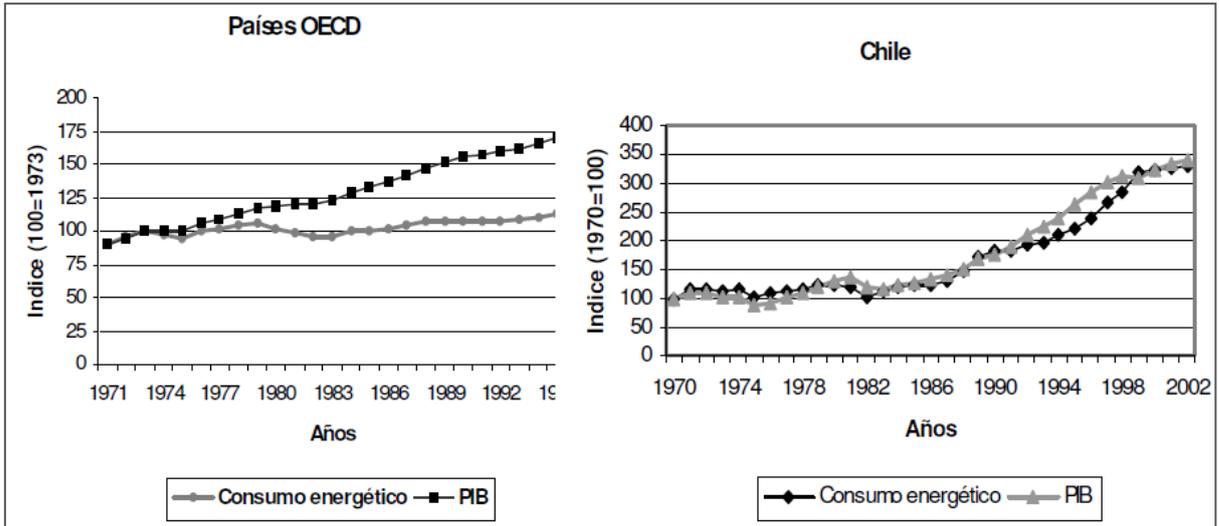
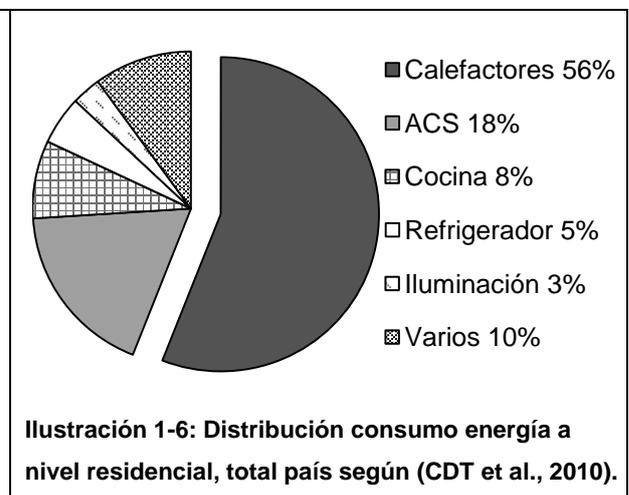
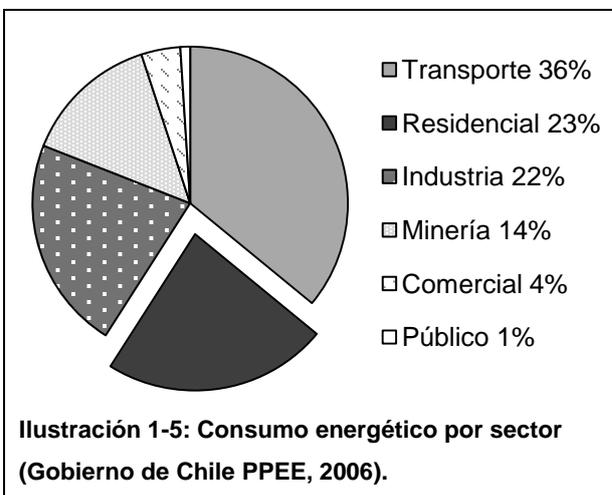


Ilustración 1-4: PIB y consumo energético en comparación entre Chile y países OECD (SERNAC-CNE, 2005).

En los países desarrollados de la ODEC se mantiene, como lo muestra la ilustración 1-4, la demanda energética estable a pesar que el PIB crece. En Chile crece el consumo energético en proporción al PIB de año en año. Esto muestra el gran potencial que existe en Chile para la mejora de la eficiencia energética. Junto con aumentar la eficiencia energética en el país se pueden reducir las emisiones de CO². Existen varios sectores, donde se puede aumentar la eficiencia energética, uno de ellos es el sector residencial.

El consumo de energía del sector residencial, que abarca viviendas, locales comerciales y oficinas, representa, como se puede observar en la ilustración 1-5, un 28% del total de la energía final consumida en el país según (Gobierno de Chile PPEE, 2006). Esto constituye el 31% del total de la electricidad consumida, el 29% del total de gas natural y el 73% del total de leña. En este sector, los principales usos que se dan a la energía, son como se observa en la ilustración 1-6: calefaccionar, calentar agua (ACS) y cocinar.



Según Seeger (Seeger, 2007) en las casas habitación en Chile el potencial de ahorro energético es bastante grande, en especial en zonas con temperaturas no muy extremas, como en la zona central, en que las casas, en general, están muy mal construidas, sin consideración alguna del aspecto energético.

(Ambiente Consultores, 2007) realizaron el estudio: “Preinversional para el Reacondicionamiento Térmico del Parque de Viviendas Existentes”. Se calculó, la demanda energética correspondiente a la situación actual de las tipologías, representando el comportamiento térmico de las viviendas, sin ninguna intervención, y representan el 66% de los permisos de construcción otorgados en el país durante el periodo 1994-1998. Estas tipologías cuentan con superficies entre 32 y 81 m², incluyendo tanto casas como departamentos, así como, diversos materiales de construcción. Estas tipologías generan diversos consumos anuales en energía de calefacción para las distintas ciudades, típicamente en un rango de 100 a 300 kWh/m² año para todo el país. La vivienda promedio a nivel nacional demanda una intensidad energética de 208 kWh/m² año, con una desviación estándar de 150 kWh/m² año. Las demandas por ciudad y tipología del parque de las viviendas existentes se muestran en la ilustración 1-7.

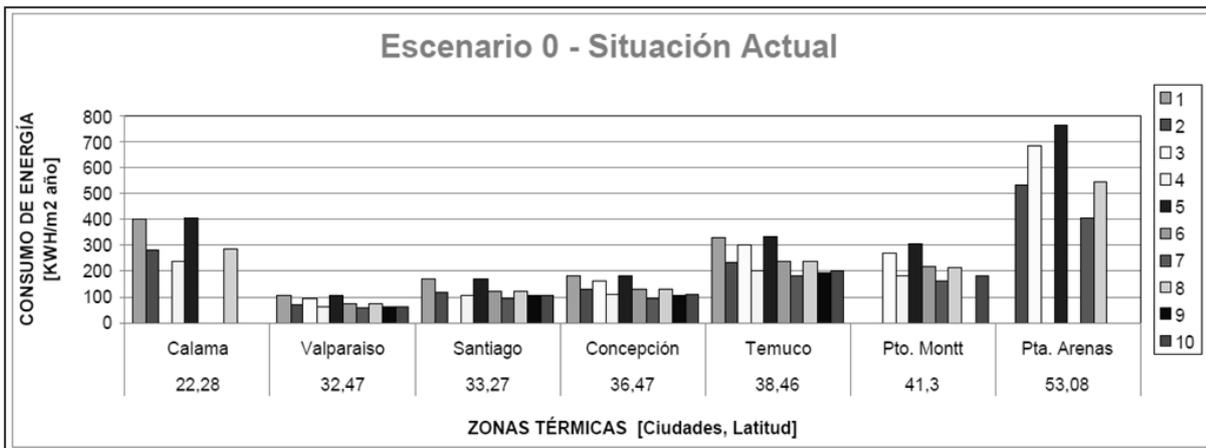


Ilustración 1-7: Consumo de energía para escenario actual, en orden de latitud y diferentes tipologías (Ambiente Consultores, 2007).

Viviendas construidas después de la implementación de la segunda etapa de la reglamentación térmica en Chile en el año 2007, muestran una demanda energética considerablemente más baja que las viviendas existentes. Estudios realizadas sobre el consumo teórico en viviendas sociales (Bustamante, et al., 2009) arrojan como resultado una demanda energética en calefacción de aproximadamente 100-150 kWh/m²a y en Punta Arenas una demanda sobre los 180 kWh/m²a. Estos resultados coinciden con los resultados publicados por

Fissore (Fissore and Colonelli, 2009). Estos valores están referidos a viviendas nuevas siendo bastante más deficitarios en viviendas antiguas.

Posiblemente, los resultados de los estudios teóricos, no representan completamente la realidad en la actualidad, dado que, los resultados se obtuvieron bajo el supuesto de una temperatura de confort interior adecuada. Como ya se ha mencionado anteriormente, en el capítulo sobre el confort interior, las viviendas actualmente no cuentan con estas condiciones, por lo tanto, no presentan un consumo energético tan alto como se ha mencionado en los estudios.

Sin embargo, según el autor, la situación cambiará en el futuro, dado que, la situación económica mejorará, sobre todo en los sectores de bajos recursos. Los habitantes, por lo tanto, tendrán los recursos para climatizar a un nivel de confort deseado, lo que significa un aumento del consumo energético a los niveles nombrados anteriormente.

1.2 Estándares energéticos, reglamentaciones y certificaciones

1.2.1 Normas y la reglamentación térmica en Chile

En Chile existen 2 tipos de regulaciones relacionadas a la eficiencia energética en la construcción según Fissore (Fissore and Colonelli, 2009): la Normativa Chilena y la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción. La principal diferencia entre ambas es que la Ordenanza es de carácter obligatorio, en cambio la Normativa tiene un carácter voluntario. En el ámbito de las normas chilenas, existen un número importante de ellas que están relacionadas con el tema del presente estudio como las normas (NCh853 of, 2007; NCh1079 of, 2008; NCh1973 of, 2008). Además, en los últimos años se ha hecho un esfuerzo importante por actualizar y completar este grupo de normas.

En el año 1996 el Ministerio de Vivienda y Urbanismo estableció un Programa de Reglamentación sobre Acondicionamiento Térmico de Viviendas (Marín et al., 2010). Este Programa consta de tres etapas, de las cuales las dos primeras ya se encuentran en vigencia:

1ª Etapa: Aislación de techumbre.

2ª Etapa: Aislación de muros, ventanas y pisos ventilados.

3ª Etapa: Certificación energética de las edificaciones.

Los objetivos que buscan satisfacer las dos etapas vigentes son, disminuir al máximo el consumo de energía, utilizar y optimizar las ganancias internas y externas. Y, en el caso que se requiera calefaccionar o enfriar un recinto, utilizar sistemas no contaminantes, eficientes y de bajo costo. La primera etapa entró en vigencia en marzo del 2000 mientras que la segunda, en enero del 2007, ambas a través de modificaciones en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, en el artículo 4.1.10 (MINVU, 2006) , el cual establece exigencias de aislación térmica dependiendo de la zona en que se emplace la vivienda. Si bien, la Reglamentación Térmica (RT) vigente ha generado beneficios para las viviendas acogidas a ésta, es decir, en el caso de techumbres para las viviendas construidas a partir del año 2000 y para muros, ventanas y pisos ventilados desde el año 2007, existe un gran número de viviendas que no cuentan con un sistema de aislación térmica adecuado, debido a que no existía legislación que les exigiera cumplir con requisitos mínimos de resistencia térmica en la envolvente. En el año 2010, existían, según Marín, un 74% de viviendas que no se encontraban acogidas a ninguna exigencia térmica, que fueron construidas antes del año 2000, y un 19% que sólo se encontró acogida a la Primera Etapa de la Reglamentación Térmica, es decir, sólo cuentan con aislación de techumbre, correspondiente a las viviendas construidas entre los períodos de marzo de 2000 y febrero de 2007. Con la implementación de la RT, se redujo la demanda energética de las viviendas construidas considerablemente, como se ha mostrado en el punto anterior, sobre el consumo energético en Chile.

Al ser exigido el cumplimiento de estas reglamentaciones por parte de las Direcciones de Obras Municipales, se han introducido según (Fissore and Colonelli, 2009) los conceptos de aislación térmica en el ámbito de arquitectos, constructores y agentes inmobiliarios, generando un conocimiento de los elementos de aislación, de su aplicación y usos en las viviendas.

“A pesar de las deficiencias que muestra la Reglamentación Térmica vigente, nuestro país ha podido hacer uso de una metodología que hace posible generar recomendaciones para incrementar la calidad térmica de los edificios. Existe, en Chile, suficiente información climática y se cuenta con los recursos humanos suficientemente preparados para llevar a cabo un proceso moderno, con respaldo técnico y científico, y que podrá estar a la altura de lo que el estado del arte mundial exhibe en torno a la elaboración de recomendaciones de diseño arquitectónico, para edificios de todo tipo, teniendo en consideración todas las variables que inciden en su comportamiento energético y que puedan formar parte de normas y legislaciones que el país requiera.” (Bustamante, 2008).

La cita, de Bustamante, manifiesta que las exigencias de la Reglamentación térmica no son muy altas y hoy en día pueden ser fácilmente superadas. Edificaciones construidas de acuerdo a la reglamentación, muestran todavía una demanda energética más elevada, que edificios construidos, por ejemplo, en Alemania, según su normativa y un clima mucho más severo en invierno. En la tabla 1-5, se muestran los valores U máximos permitidos según la Reglamentación térmica RT. Estos valores no son muy exigentes en comparación a las recomendaciones de la norma (NCh1079 of, 2008). A parte de indicar exigencias para la envolvente, no aparecen otras limitaciones en la reglamentación térmica, como por ejemplo, la hermeticidad del edificio, la cual influye altamente en la demanda energética.

Tabla 1-5: Valores U máximos permitidos por zona según la Reglamentación térmica (MINVU, 2006).

	Techumbre	Muros	Pisos Ventilados
Zona	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
1	0,84	4,0	3,60
2	0,60	3,0	0,87
3	0,47	1,9	0,70
4	0,38	1,7	0,60
5	0,33	1,6	0,50
6	0,28	1,1	0,39
7	0,25	0,6	0,32

1.2.2 Reglamentación térmica

La calificación energética es la determinación del nivel de desempeño energético referencial e informativo de una vivienda, muy similar al sello de eficiencia que tienen los refrigeradores, según el Ministerio de Energía (Gobierno de Chile, 2010). En este caso, va desde la letra **A** a la **G**, es decir, de mayor a menor eficiencia, con respecto a una vivienda de referencia. Es un proceso voluntario que determina el desempeño energético de la vivienda, a partir de los requerimientos energéticos para calefacción, iluminación y agua caliente sanitaria. Se evalúa a través de una calificación energética que conduce a un Certificado y Etiqueta. Se puede realizar en dos etapas: la Pre-Certificación de planos y la Certificación de Obra Terminada, la cual considera las características finales de la vivienda a través de una inspección técnica visual y revisión del proyecto final que cuente con recepción definitiva. Esta información sería entregada por parte de propietarios y vendedores a los posibles compradores, para que el comportamiento energético de la vivienda se convierta en una de las características más importantes a tener en cuenta a la hora de comprar una vivienda. El Sistema

de Certificación Energética de Viviendas será administrado por el MINVU, el que regulará la operatividad del sistema, dirigirá la aplicación de la herramienta de cálculo, además, de fiscalizar la veracidad y exactitud de los certificados que se emitan.

Se pretende incorporar el sistema de la certificación energética a fines del año 2012 con el carácter voluntario. En algunos años más, posiblemente, será obligatorio.

Se eligieron los criterios para la clasificación, según (Fissore and Colonelli, 2009) a través de los objetivos mostrados en la tabla 1-6. Cada objetivo está asociado a una clase, de **A** hasta **G**, donde la clase **E** representa un diseño, que cumple con la reglamentación térmica.

Tabla 1-6: Objetivos para cada clase de la certificación según (Fissore and Colonelli, 2009).

Clase	Objetivos
A	Esta clase corresponde a la mayor eficiencia que se pudiera lograr en una vivienda, sin considerar los costos de inversión.
B	Vivienda de alta eficiencia energética.
C	Vivienda Eficiente sin un excesivo costo de inversión. Generalmente no considera termopanel.
D	Se obtiene este nivel con pequeñas mejoras a la envolvente.
E	Caso Base.
F	Viviendas que incluyen aislación en techumbre.
G	Viviendas que no incluyen ningún tipo de aislación.

En un primer paso, hay que obtener la demanda energética de la edificación, la cual se pretende construir y la demanda energética de un edificio de referencia. Para este fin, se puede descargar en la página web del MINVU el programa de cálculo CCTE_CL V2 que permite obtener las demandas energéticas del edificio y del edificio de referencia. La edificación de referencia debe cumplir exactamente con las exigencias de la reglamentación térmica, y su demanda energética representa el caso base. Después, se debe analizar la edificación o el caso de estudio, e incorporar las posibles mejoras y luego determinar el porcentaje de esta demanda energética, en comparación al caso base. Se puede clasificar el caso a partir de este indicador según la tabla 1-7, en dependencia a la zona térmica. Si el caso tiene, por ejemplo en la zona térmica 4, solo un 60% de la demanda energética del caso base, se calificará con la letra **C**.

Tabla 1-7: Calificación Energética- Indicador de Demanda de Energía (Fissore and Colonelli, 2009).

Calificación	Zona Térmica 1 y 2	Zona Térmica 3, 4 y 5	Zona Térmica 6 y 7
A	$C < 30$	$C < 40$	$C < 55$
B	$30 \leq C < 40$	$40 \leq C < 50$	$55 \leq C < 65$
C	$40 \leq C < 55$	$50 \leq C < 65$	$65 \leq C < 85$
D	$55 \leq C < 75$	$65 \leq C < 85$	$85 \leq C < 95$
E	$75 \leq C < 110$	$85 \leq C < 110$	$95 \leq C < 110$
F	$110 \leq C < 135$	$110 \leq C < 135$	$110 \leq C < 135$
G	$135 \leq C <$	$135 \leq C <$	$135 \leq C <$

C se define como el consumo o demanda de la vivienda objeto dividida por el consumo o demanda de la vivienda de referencia y multiplicada por 100.

Para la obtención del certificado, hay que realizar, una clasificación por consumo de energía primaria, incluyendo iluminación y agua sanitaria caliente. Además, se debe indicar para la certificación, el riesgo de sobrecalentamiento en verano y el porcentaje de aporte de energías renovables para cada consumo.

La certificación energética tiene sus raíces en la gran difusión de los últimos años, con respecto a una posible crisis energética en el país. Esto hace suponer que hoy en día existe una mayor conciencia en torno al problema, que hasta hace pocos años atrás, y por consiguiente, un interés en el mercado nacional en torno al ahorro energético de las viviendas o edificios públicos. El estado ha demostrado interés en apoyar iniciativas que conduzcan a un ahorro energético lo que queda demostrado con las bonificaciones aprobadas para la instalación de placas solares para calentamiento de agua, la reglamentación térmica o con la certificación energética de las viviendas. Sin embargo, hay que seguir con el esfuerzo y aumentar, posiblemente en un futuro cercano, las exigencias y ampliar el esfuerzo, como por ejemplo, en edificios de oficinas y en construcciones existentes. En un futuro será deseable, aumentar las exigencias poco a poco, llegando a un punto, hasta que las construcciones nuevas obtendrán en su mayoría la clasificación **B**, **A** o **A+++**.

Hernández (Hernández and Meza, 2011) por ejemplo, formula una propuesta de una metodología de certificación de eficiencia energética para viviendas en Chile, que incorpora aspectos adicionales, como, entre otros, el rendimiento de equipos de climatización.

Todos estos aspectos muestran, que hay una conciencia en el tema y que la eficiencia energética en el sector de la construcción aumentará en el futuro. Sin embargo, todavía existe una diferencia enorme, entre la demanda energética de edificaciones construidas según la reglamentación térmica vigente y la demanda energética, que pueden lograr edificios, construidos según algunos estándares energéticos existentes a nivel mundial.

1.2.3 Estándares energéticos en general y estándares de bajo consumo energético

Las primeras normas de eficiencia energética para edificios surgen, según Fissore, en la década del 70, durante la crisis del petróleo (Fissore and Colonelli, 2009). A raíz de esto, diversos países lanzaron programas de incentivos para la reducción del consumo de energía, resultando posteriormente normas de eficiencia energética, como el Estándar 90 Conservación de Energía en Diseño de Nuevos Edificios (ASHRAE), la norma de California Título 24 de 1978 y la reglamentación alemana WSchVO 1977, entre otras.

La siguiente ilustración 1-8, muestra, a través del ejemplo de Alemania, la reducción de la demanda energética en calefacción de las edificaciones durante los años, después de la implementación de distintas reglamentaciones energéticas.

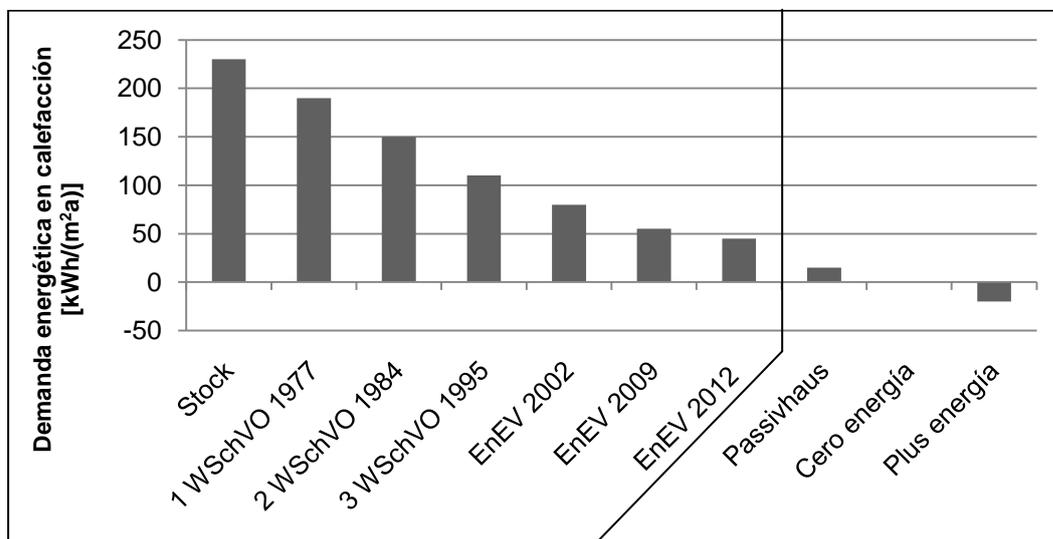


Ilustración 1-8: Reducción del consumo energético de edificaciones en Alemania con la implementación de estándares energéticos y con un aumento de las exigencias durante los años (elaboración propia).

Se puede observar, que las exigencias aumentaron durante los años, después de la implementación de la primera reglamentación en el año 1977 y siguen siendo aún más exigentes hasta hoy en día, con la implementación de la EnEV 2012 durante el año 2012-2013. En múltiples países del mundo, sobre todo en Europa, ocurrió una situación similar.

Se establecieron, a nivel internacional, a parte de las reglamentaciones del Estado, algunos estándares o términos, que son más exigente que las reglamentaciones vigentes. Entre ellos el estándar Passivhaus, el estándar Minenergie-P, el estándar LEED, edificaciones de cero consumo de energía y edificaciones plus energía. Se muestra en la ilustración 1-8, en el lado derecho algunos de estos. Estos estándares tienen en común, que en ellos, se pretende aumentar la eficiencia energética y la sustentabilidad de las edificaciones, a un máximo. Las edificaciones de cero consumo o de plus energía, implementan adicionalmente una

fuentes de generación de energía in situ, para cubrir las necesidades energéticas restantes. Estos términos, de cero consumo y de plus energía, todavía no tienen una definición internacionalmente establecida, como muestra por ejemplo Hernández (Hernandez and Kenny, 2010; Hernandez and Kenny, 2011).

Estándares de casi-cero consumo energético, no son una ficción, como muestra la directiva de la Unión Europea (DIRECTIVE 2010/31/EU, 2010) del 19 de Mayo de 2010. El comité define en el artículo 9 de esta directiva, que después del año 2018 deben ser todas las edificaciones públicas de los estados miembros, construcciones de casi cero-energía y después del año 2020 todas las construcciones nuevas. A continuación en la ilustración 1-9, se muestra una primera parte del artículo 9 de esta directiva.

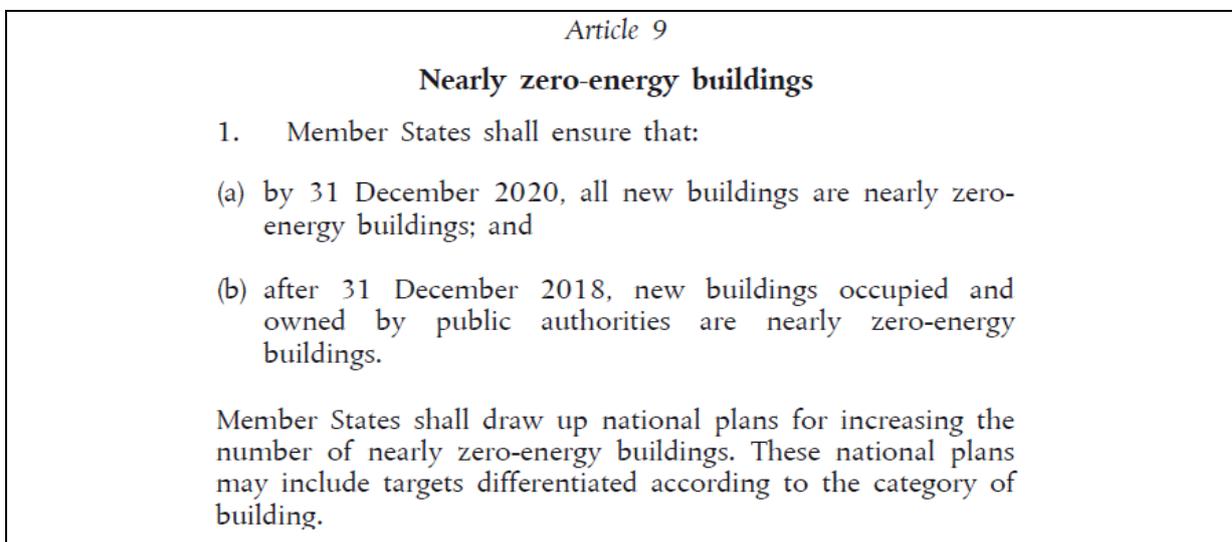


Ilustración 1-9: Directiva de la Unión Europea para establecer el estándar de casi cero-energía en edificaciones para el año 2021 (DIRECTIVE 2010/31/EU, 2010).

Uno de estos estándares, el cual encaja en el concepto de “casi cero-energía”, es el estándar Passivhaus, el cual es el objetivo del presente trabajo. Este estándar, cuenta con un consumo de energía bajísimo y un confort interior alto. Edificaciones construidas según el estándar Passivhaus son, en general, económicamente rentables en comparación a las casas de cero consumo o de plus energía. Las casas de cero consumo y de plus energía, implementan generalmente, tecnologías que hoy en día todavía, son caras, como por ejemplo, paneles fotovoltaicos, por lo tanto, actualmente no son alternativas económicamente factibles. Se explica el estándar Passivhaus en los siguientes sub capítulos de una manera más detallada, dado que, se pretende en el marco del presente trabajo, analizar la factibilidad de la implementación de este estándar en el centro sur de Chile.

1.3 El estándar Passivhaus: Confort interior alto, consumo energético bajísimo y económicamente rentable

1.3.1 La historia o la invención del estándar Passivhaus

La vivienda pasiva no fue inventada sino que más bien fue descubierta (Feist, 2006): En muchas oportunidades durante el desarrollo de la historia se aplicaban ciertos principios antes de tener conciencia de ellos. En el descubrimiento del estándar participaron muchas instituciones y personas y sin la participación de todas ellas no se podría haber armado este concepto. Las exploraciones científicas siempre están basadas en resultados anteriores sin tener clara conciencia de ello. En muchos casos fueron importantes las opiniones de personas que estimaban trascendentes las hipótesis que algún científico planteaba. Esto ayudaba a profundizar los planteamientos y clarificar los conceptos que se estaban elucubrando. El término Passivhaus no es simplemente una nueva nominación para lo que se ha denominado “Superinsolated Houses”, a pesar que una vivienda pasiva con un importante aislamiento térmico, ubicada en un clima de temperaturas bajas, podría tener características parecidas. El concepto de la vivienda pasiva no indica la técnica a emplear para lograr las metas propuestas. Las denominadas “Passive Solar Houses” y las “Superinsolated Houses” actuaron, mucho tiempo, como competidores de ideas distintas, pero el pionero de las “passive solar architecture” americana, Robert Hastings, logró superar estas diferencias. La unión de los dos conceptos es básicamente el fundamento del estándar Passivhaus.

A continuación, una recapitulación de un resumen del desarrollo histórico de las casas Passivhaus de un artículo de Feist (Feist, 2006):

- *Viviendas pasivas tradicionales:* En muchas regiones del mundo, como en algunas regiones de China, Portugal, Perú, Colombia, países Centroamericanos no se requiere calefacción y tampoco sistemas de aire acondicionado, si se construye adecuadamente. En esos lugares la mayoría de las casas cumplen con las condiciones de una vivienda pasiva, aunque nunca fueron nominadas o clasificadas como tales. Esto lo realizó Bo Adamson, quién se hizo la pregunta, si estas experiencias no serían posibles de traspasar, con apoyo tecnológico adecuado, a otras condiciones climáticas (Adamson, 1992).
- *Viviendas tradicionales pasivas en Islandia:* En la Edad Media, se produjo en Europa una falta absoluta de madera para la calefacción, por lo tanto fue reemplazada por carbón, material que no existía en Islandia. A raíz de esto, nació la idea de extraer material de las turberas y construir su vivienda con este material, parecido al adobe,

lográndose viviendas con un excelente aislamiento, aunque sin ventanas y por lo tanto con una ventilación deficiente. Sus habitantes descubrieron que una vivienda bien aislada mantiene una temperatura interior que garantiza un confort térmico.

- *Investigación sistemática; Vagn Korsgaard y las vivienda cero energía:* La vivienda cero energía de Korsgaard (Korsgaard et al, 1978) fue una vivienda pasiva. Sistemáticamente se realizaban investigaciones en la Universidad Técnica de Dinamarca, como simulaciones térmicas, optimización de diseños y construcción de una primera casa de esas características. La edificación sigue en uso siendo a la fecha una casa de huéspedes de la Universidad y todos los sistemas funcionan aún hoy en día, aunque el sistema de captación solar no ha sido renovado. Posteriormente el concepto de la vivienda cero energía fue siendo reemplazado por el concepto de la vivienda de bajo consumo energético por asuntos económicos.
- *William Shurcliff y Wane Shick: pioneros de la investigación en Norte América:* Una serie de desarrollos norteamericanos en los años 70 y 80 (superinsulated houses) estuvieron muy cerca de lo que hoy se denomina vivienda Passivhaus. William Shurcliff publicó una serie de artículos entre otros (Shurcliff, 1980). Estos trabajos fueron una base importante para el desarrollo de las viviendas de bajo consumo energético y viviendas Passivhaus en Europa.
- *Primera vivienda Passivhaus en Darmstadt, Alemania 1991:* Un equipo internacional de investigadores, entre ellos Bo Adamson, participó en un proyecto de investigación (Feist, 1992) sobre la implementación del estándar Passivhaus. Se investigó sistemáticamente las condiciones, para la implementación de casas de un consumo energético bajísimo, se elaboró partes de la envolvente, como marcos de ventanas con aislamiento adecuado para evitar puentes térmicos y se desarrollaron nuevas tecnologías, como un sistema de ventilación con control de CO². Una empresa inmobiliaria construyó el prototipo de una casa continua para cuatro familias, la cual está habitada desde el año 1991 y cumplió en el año 2011 veinte años. En el monitoreo de las viviendas, se pudo comprobar el funcionamiento del aislamiento térmico, del sistema de ventilación con recuperación de calor y otros factores. Se pudo comprobar, que bajo un uso normal de las viviendas, se logró durante 15 años un consumo energético para calefacción menor a 10 kWh/(m²a), lo que significa una reducción de un 90% en comparación a una vivienda tradicional. Se observó durante el monitoreo una calidad del aire muy bueno y se mostró a través de mediciones y encuestas a los usuarios, que se lograron condiciones de confort térmico altas.

A través de las experiencias obtenidas en la investigación y de los proyectos construidos, elaboraron, Feist y otros, la definición del estándar Passivhaus en climas europeos, el cual se explica en el siguiente punto.

1.3.2 Definición del estándar Passivhaus en climas europeos según el instituto “Passivhausinstitut Darmstadt”

Con las experiencias obtenidas a través de los proyectos históricos y con los proyectos de investigación, se formuló la definición del concepto Passivhaus, la cual es independiente del clima y del lugar, donde se pretende construir la edificación.

La definición del estándar Passivhaus es según Feist: **"Una edificación Passivhaus es un edificio en el que el confort térmico (p. ej. según ISO 7730) se puede garantizar sólo por calentamiento o refrigeración del flujo de volumen del aire fresco, el cual es necesario para una calidad del aire adecuada (p. ej. según DIN 1946), sin utilizar ayuda adicional al aire recirculado"** (Feist, 2005).

Esta definición es, según Feist, una definición universal, la cual no contiene valores de consumos energéticos establecidos y es válido para cualquiera situación climática.

El primer objetivo de la definición del estándar es, garantizar las condiciones del confort térmico descritas en el capítulo 1.1.2 y garantizar una calidad del aire interior adecuada.

El segundo objetivo de esta definición es, aunque no se puede deducir a simple vista, la reducción de los costos de inversión inicial de la construcción (Feist, 2004). Al aumentar drásticamente la eficiencia energética de un edificio y al llegar a un cierto nivel de eficiencia, se pueden simplificar y reducir radicalmente los sistemas de climatización, dado que, no tienen que cubrir potencias máximas altas. Se pretende bajar los costos de inversión inicial en las casas Passivhaus, con la sustitución del sistema de calefacción central tradicional, por un sistema de ventilación, siempre si el sistema de ventilación es capaz de climatizar los recintos a las temperaturas deseadas. El logro de la climatización de los recintos, a través del flujo del aire del sistema de ventilación, necesario para garantizar la calidad del aire, significa una ventaja económica en comparación a casas de bajo consumo energético, dado que, las casas de bajo consumo todavía requieren de un sistema adicional de climatización. Se puede observar este fenómeno en la ilustración 1-10. Si se aumenta la eficiencia energética hasta un cierto punto, se produce una ruptura en la curva de los costos totales capitalizados. Esta ruptura describe justamente la posibilidad de eliminar el sistema de climatización convencional y reducir así los costos de inversión inicial. Una mejora de la eficiencia, más allá de este punto, hasta la casa de cero consumo, hoy en día en general no es rentable.

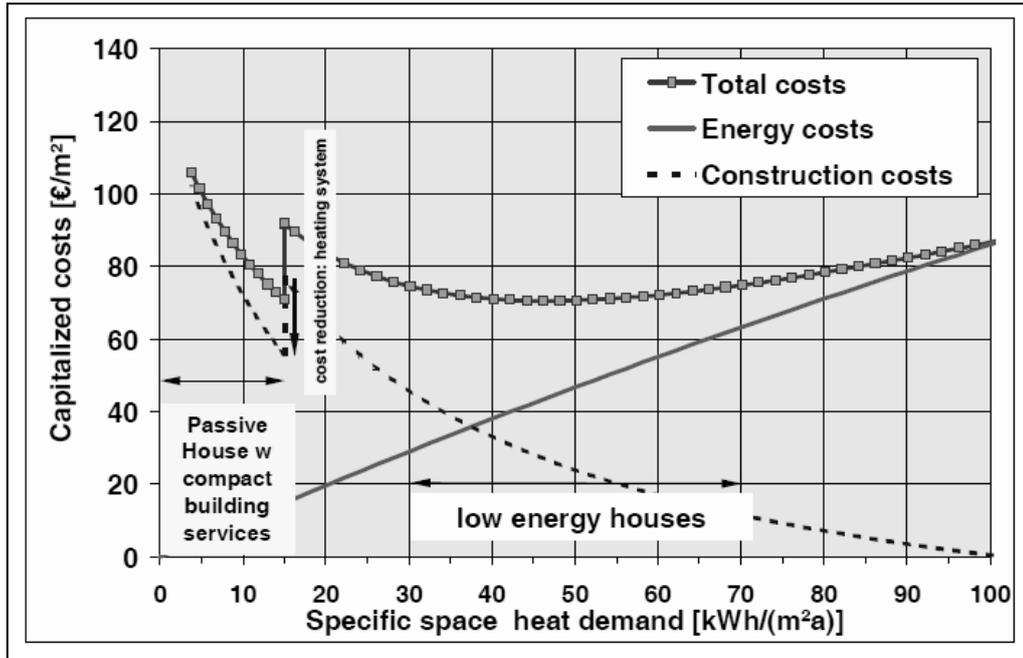


Ilustración 1-10: Costos capitalizados en relación a la demanda energética en calefacción para Europa central (Feist, 2004).

Para poder sustituir el sistema de climatización tradicional, se debe garantizar la posibilidad de climatizar los recintos de la edificación a través del sistema de ventilación. A través de la definición funcional de Feist, se puede calcular con la siguiente ecuación (1.1), la potencia máxima de calefacción y refrigeración, la cual se puede entregar al recinto a través del flujo del volumen del aire, necesario para una calidad del aire interior adecuada.

$$P_{\max} = V_{\text{aire}} \cdot c_{\text{aire}} \cdot \Delta\theta \tag{1.1}$$

- P_{\max} [W] Potencia máxima posible de transportar con el aire
- V_{aire} [m³/h] Caudal de aire por hora
- c_{aire} [Wh/m³K] Calor específico volumétrico del aire (0,33 Wh/(m³K))
- $\Delta\theta = T_{\max} - T_{\text{int}}$ [K] Delta de la temperatura entre Temperatura interior y temperatura máxima permitida del aire
- T_{\max} [K] Temperatura máxima permitida del aire

A continuación, se determina, como ejemplo, la potencia máxima de calefacción a través del aire. La temperatura máxima permitida para calentar el aire es de 50°C, dado que, con temperaturas más elevadas se queman las partículas, como por ejemplo el polvo en el aire. Esta combustión produce una contaminación del aire y malos olores.

Con un volumen de aire necesario de aprox. 30 m³/h por persona, para garantizar condiciones de higiene según DIN 1946 y una temperatura de confort interior de 20°C en invierno, se puede determinar la potencia máxima de calefacción en relación al número de personas por vivienda con la siguiente ecuación:

$$30 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{pers}) \cdot 0,33 \text{ Wh}/(\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{C}) \cdot (50 - 20) \text{ }^\circ\text{C} = 300 \text{ W/persona} \quad (1.2)$$

Asumiendo para Europa central una superficie útil de 30 m² por persona según (Feist et al., 2007), se puede calcular la potencia máxima posible de calefaccionar a través del flujo de aire por m² superficie útil interior de la vivienda con la siguiente ecuación:

$$(300 \text{ W/pers}) / (30 \text{ m}^2/\text{pers}) = 10 \text{ W/m}^2 \quad (1.3)$$

O sea: Se puede entregar una potencia máxima de 300 vatios por persona calefaccionando a través del flujo de aire o, asumiendo una ocupación de 30 m² superficie por persona, una potencia máxima de 10 W/m² y esto independiente del clima.

Esto significa, que se puede calefaccionar una casa Passivhaus con una superficie útil de 100 m² con una potencia máxima de 1000 W, la cual es la potencia de un secador de pelo común. La validez de estos valores tan bajos son mostrados por Feist a través de simulaciones y del monitoreo de casas construidas en (Feist, 2005).

Hay que distinguir estos valores de la potencia en W (vatios), de los indicadores de energía (trabajo, en kWh). Con la potencia máxima descrita de 10 W/m² surge para Europa central, de la experiencia y a través del análisis con programas de simulación, una demanda energética en calefacción de aproximadamente 15 kWh/(m²a) -, pero sólo "aproximadamente". En Estocolmo, pueden ser de 20 kWh/(m² a), en Roma posiblemente 10 kWh/(m² a).

En la mayoría de la literatura se exige, de acuerdo a lo descrito, una demanda energética en calefacción o refrigeración de no más de 15 kWh/(m²a) para lograr el estándar Passivhaus, aunque este criterio no está descrito con esta rigidez en la definición del estándar Passivhaus de Feist.

A partir de la definición funcional del estándar Passivhaus según Feist y para la certificación del mismo estándar existen algunos criterios para Europa central, formulados por el instituto de las casas pasivas "Passivhausinstitut Dr. Wolfgang Feist". Se cumple el estándar Passivhaus, si se consiguen todos los parámetros de los siguientes requisitos según (Gantioler, 2010):

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

Los primeros tres puntos, de las demandas máximas y de las potencias máximas, se explicaron anteriormente. Las razones por las cuales se le da importancia a la hermeticidad de la envolvente exterior son, evitar daños por condensación interior en los muros exteriores y el confort de los usuarios al no producirse corrientes de aire frías y zonas de baja temperatura. Además, se puede bajar la demanda energética con una reducción de las infiltraciones de aire frío en el recinto interior.

El consumo de energía primaria para todos los servicios de energía, incluyendo calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria, electrodomésticos y alumbrado, no debe exceder de 120 kWh por m² de superficie habitable y por año. Esto es debido a varias razones, con visión futura, como son el incentivo al uso de energías renovables y al uso de artefactos eléctricos que garanticen un ahorro energético.

Temperaturas superficiales interiores de la envolvente térmica durante invierno >17°C para garantizar confort térmico y para evitar riesgos para la salud por crecimiento de moho. Este punto se explica con mayor detalle en el capítulo 3.1.3.

Los requisitos deben ser calculados mediante el programa PHPP con sus condiciones bordes. El programa de cálculo PHPP es explicado con más detalle en el capítulo 2.2.2.

Casas que cumplen con el estándar Passivhaus muestran, en general, una reducción de la demanda energética en un promedio entre un 70% y 90% en comparación a una casa de referencia, construida según los requerimientos de las reglamentaciones nacionales. Esto se puede observar en la ilustración 1-11, la cual muestra los resultados obtenidos en el marco del proyecto CEPHEUS "Cost efficient Passive Houses as European Standards". En este gráfico se muestra la reducción de la demanda energética en calefacción de casas construidas según el estándar Passivhaus en distintas ciudades europeas.

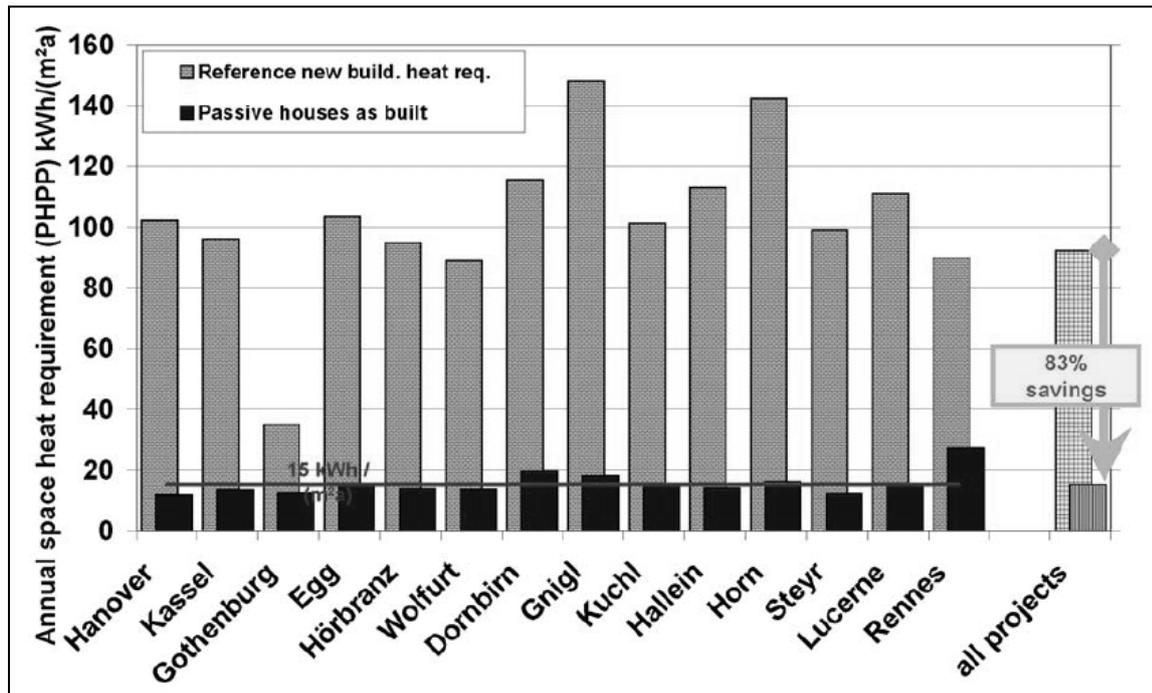


Ilustración 1-11: Comparación de la demanda energética en calefacción calculada entre edificaciones de referencia, construidas según las reglamentaciones nacionales, y edificaciones Passivhaus (Feist et al., 2001).

Los costos de construcción de una casa Passivhaus son generalmente más elevados, que los costos de construcción de una casa tradicional. En el marco del proyecto CEPHEUS (Feist, et al., 2001) fueron evaluadas 212 viviendas Passivhaus construidas de diferentes tipos y los costos de construcción fueron de 0 a 17%, con un promedio de 8% más elevadas que los costos de construcción de los casos de referencia. Estos costos más elevados se pueden recuperar a través del ahorro en gastos energéticos durante la vida útil de las viviendas. El promedio de la recuperación estática de la inversión inicial más alta en este proyecto fue de 21 años.

Desde el estudio CEPHEUS en el año 2001, hasta hoy, bajaron los costos de construcción de una edificación Passivhaus, dado que, los componentes son más accesibles y el mercado de las casas Passivhaus está creciendo, lo que significa, en general, una reducción de los costos. Hoy en día, se pueden construir edificaciones Passivhaus en Europa central muchas veces sin un costo más alto en comparación a una construcción según reglamentaciones actuales, como se muestra en (Feist, 2012).

En conclusión: Con el estándar Passivhaus se puede garantizar un clima interior confortable, durante el año, con una calidad de aire interior adecuada. Se puede bajar la demanda energética de una edificación, en aprox. un 80%, lo que significa menos gastos operativos, más independencia de los precios de la energía y menos emisiones de CO². Los costos de

construcción, a través de un diseño adecuado, no son generalmente o sólo ligeramente más elevados que una construcción tradicional y pueden ser recuperados durante la vida útil de la edificación a través del ahorro en gastos de operación.

1.3.3 Desarrollo del estándar Passivhaus a nivel mundial

A nivel mundial se ha desarrollado y difundido intensamente el estándar vivienda pasiva a partir de la construcción del primer Passivhaus en Darmstadt en el año 1991. A la 16ª versión del congreso Passivhaus en Hannover en el año 2012 asistieron más de 1.300 interesados de todo el mundo, que se informaron en detalle de las características de esas viviendas y actualmente hay más de 37.000 viviendas pasivas construidas (Feist, 2012), entre otras en Japón, Buenos Aires, Shanghái, Canadá y EEUU (Wilson, 2010), pero la mayoría de las construcciones se encuentran en Europa central. Todas las edificaciones públicas de la ciudad de Frankfurt am Main por ejemplo, tienen que cumplir desde el año 2007 con el estándar Passivhaus. O por ejemplo en la ciudad de Hannover cumplen aprox. el 30% de las obras nuevas con el estándar Passivhaus.

Este crecimiento, del número total de las edificaciones Passivhaus, está fuertemente basado en varias acciones y proyectos de investigación y difusión. Estos proyectos nacieron generalmente con el fuerte apoyo del instituto independiente de las casas Pasivas de Darmstadt, el cual fue fundado en el año 1996 por el Prof. Dr. Wolfgang Feist con el objetivo de promocionar y certificar el estándar. Hoy en día, el instituto es uno de los líderes en el conocimiento de construcciones energéticamente eficientes a nivel mundial (www.passiv.de). El instituto certifica casas Passivhaus, investiga en el área de eficiencia energética, realiza congresos, como el congreso Passivhaustagung, realiza capacitaciones y seminarios, desarrolla métodos de cálculo y de análisis energético y publica resultados y recomendaciones. Se han certificado más de 4.500 edificaciones según el estándar Passivhaus hasta hoy en día.

La “International Passive House Association” IPHA y su afiliada alemana, “IG Passivhaus Deutschland”, son las iniciativas de comunicación del Instituto de las Casas Pasivas, Darmstadt, Alemania, asegurando el más alto nivel de experiencia técnica, capacidad profesional, independencia y objetividad. IPHA es una red independiente de arquitectos, planificadores, científicos, proveedores, constructores, inmobiliarios y proveedores de equipos interesados en el desarrollo de los Passivhaus. En la ilustración 1-12, se pueden observar los países en los cuales existen miembros de la iPHA según (Feist, 2010).

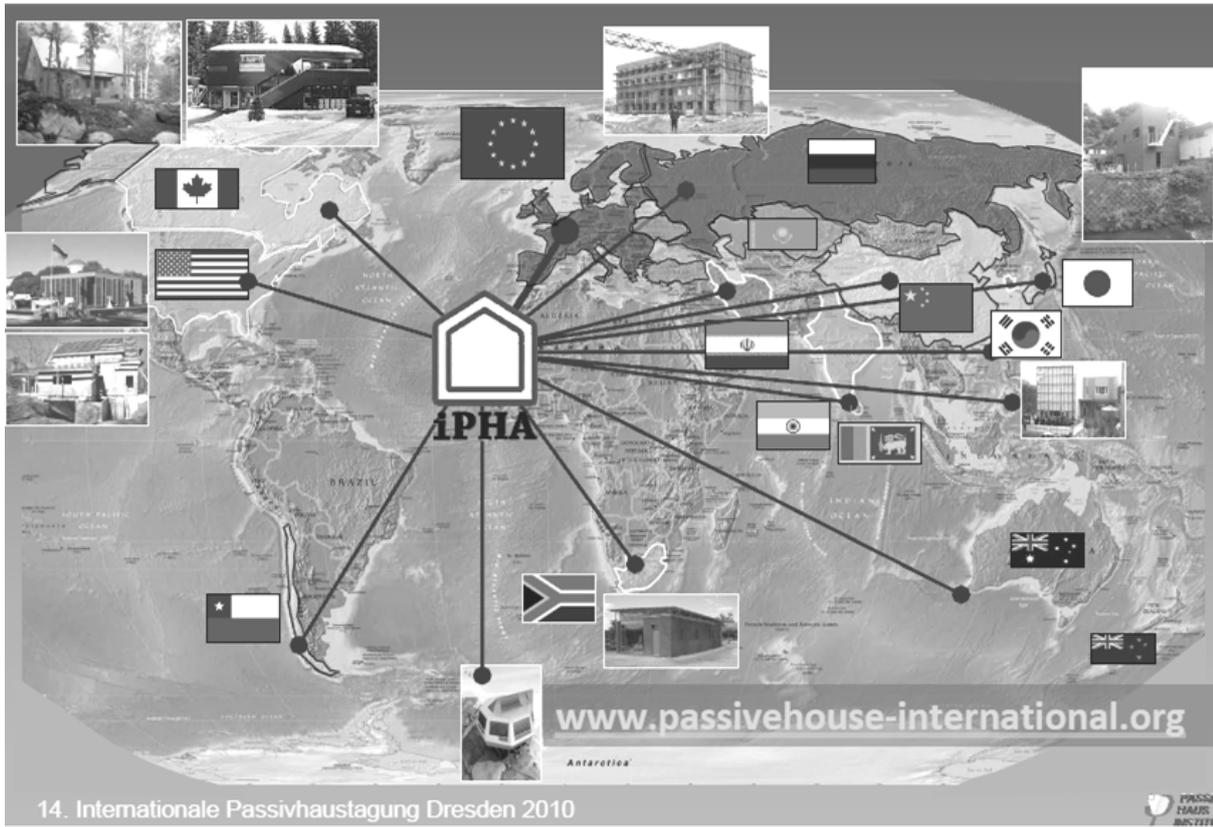


Ilustración 1-12: Países con miembros en la asociación internacional de Passivhaus en el año 2010 (Feist, 2010).

El objetivo fundamental de la iPHA es la promoción del estándar Passivhaus y lograr una mayor difusión a un mayor número de público de las características y ventajas de este tipo de edificación. Además, se pretende fortalecer el intercambio de conocimientos en torno al tema de la vivienda pasiva. IPHA se comunica con los medios, el público en general y todo el rango de profesionales de la construcción (www.passivehouse-international.org/).

Para la difusión del estándar se creó el instituto de las casas pasivas en el año 2010 una plataforma virtual cuyo nombre es “Passipedia” (Passipedia, 2010) con información en torno al tema. En este sitio pueden informarse planificadores, constructores e interesados en torno del tema Passivhaus en los idiomas alemán e inglés.

Para crear las condiciones de difusión e introducción en el mercado de los Passivhaus se creó el “European Passive House project CEPHEUS, Cost Efficient Passive Houses as European Standards” financiado por la Unión Europea (Feist, et al., 2001; Janson, 2008; Krapmeier and Drössler, 2001; Schnieders and Hermelink, 2006). En el marco del proyecto CEPHEUS, se llevaron a cabo 221 construcciones según el estándar Passivhaus en cinco países europeos. Las construcciones que participaron en el marco de este proyecto fueron evaluadas desde el punto de vista técnico, como el consumo de energía y agua caliente, y desde el punto de vista de la apreciación de los habitantes en relación al confort. El proyecto

CEPHEUS se desarrolló entre los años 1998 a 2001. Los resultados del proyecto CEPHEUS muestran que se logró un consumo energético de energía primaria bajísimo. Comparado con viviendas convencionales nuevas, el ahorro de energía final y primaria fue de un mínimo del 50%. Se enfatizó, que el uso de la electricidad por asuntos domésticos es importante para el consumo de la energía primaria y puede ser reducido. También fueron evaluadas las ganancias solares. A través de las ventanas, dimensionadas adecuadamente para garantizar luz día, las ganancias solares pueden ser usadas para cubrir un tercio de la demanda de calefacción. Se comprobó que el gasto medio de energía para el agua caliente es de 25 litros por persona por día y a una temperatura de 60°C. Las entrevistas a los usuarios arrojaron que el confort térmico era bueno a muy bueno, tanto en viviendas individuales como departamentos. En la mayoría de los proyectos CEPHEUS, no fue posible reducir los costos totales del ciclo de vida. En total, el mayor costo de construcción y sistemas de climatización varió entre un 0% y un 17%. Un promedio establecido en 12 proyectos, el gasto específico extra fue de 91€/m² o 8% del costo total de la construcción. Se espera que en el futuro estas mayores inversiones bajen significativamente. El costo de la aislación térmica ya es relativamente bajo y no influye en forma importante en el mayor costo, sino que, el mayor costo corresponde a las ventanas con excelente aislación y el sistema de ventilación.

A raíz del proyecto CEPHEUS, entre otras razones, aumentó el crecimiento de la construcción de las casas Passivhaus en Europa, como se muestra en la ilustración 1-13, en el ejemplo de Austria.

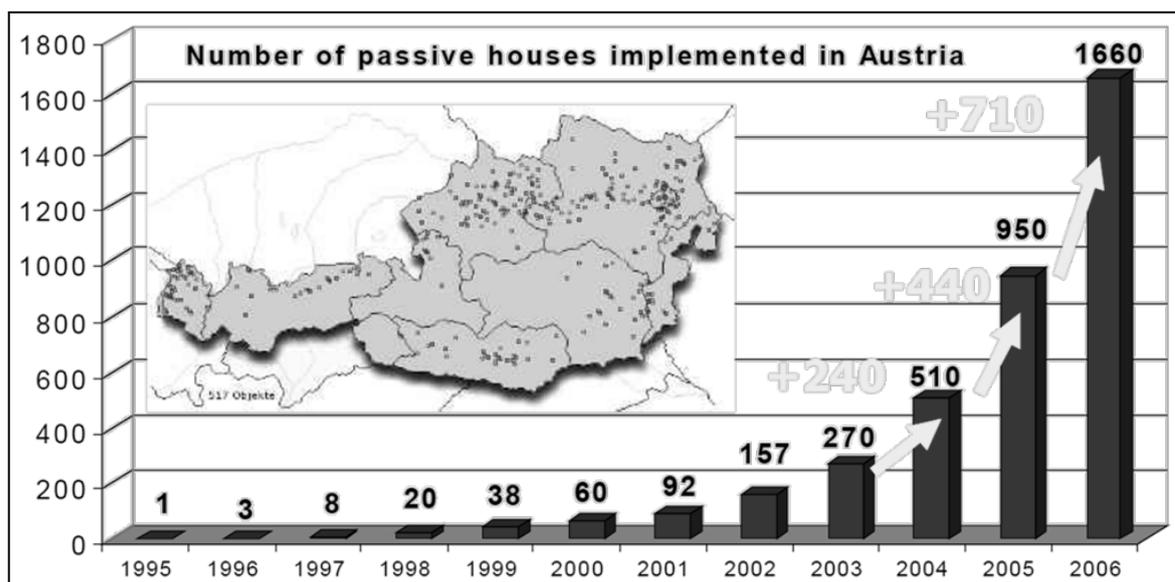


Ilustración 1-13: Crecimiento del mercado de las casas Passivhaus en el ejemplo de Austria entre los años 1995 a 2006 (Elswijk et al., 2008).

El éxito del instituto Passivhaus en el desarrollo e implementación de una aproximación al diseño energéticamente eficiente de viviendas, que garantice niveles satisfactorios de bienestar en Alemania y Austria, conduce, según Ford, de forma natural al planteamiento de si este concepto es aplicable a otros países y climas (Ford et al., 2007). Esta pregunta es común a dos proyectos financiados bajo un programa de la Comisión de las Comunidades Europeas: el 'Passive-On' y proyecto PEP. El proyecto 'Passive-on' (<http://www.passive-on.org/>) trata fundamentalmente sobre el tema de la aplicabilidad del estándar propuesto por el "Passivhaus Institut" en la Europa meridional (Portugal, España e Italia), pero también se relaciona con el Reino Unido y Francia como climas templados y fue ejecutado entre el 2005 al 2007. El resultado de los análisis realizados en las propuestas reveló que las cargas de calefacción son relativamente bajas en muchos países europeos meridionales y pueden ser inferior a 15 kWh/(m²a). Comparativamente, la demanda de calefacción es mucho menor que la demanda de energía debido a otras necesidades energéticas, tales como, agua caliente sanitaria, iluminación y electrodomésticos. En muchas ocasiones existe una cierta demanda de refrigeración y es significativa, pero puede satisfacerse, exclusivamente, mediante el uso de técnicas pasivas de refrigeración. El proyecto PEP "Promotion of European Passive Houses" fue un proyecto ejecutado para la difusión del estándar Passivhaus, con el fin de lograr la meta de la introducción de un estándar casi-cero-consumo energético. Esta meta fue, como descrita anteriormente, formulada por la Comisión de las Comunidades Europeas.

El grupo del proyecto 'Passive-On' ha reformulado brevemente el estándar Passivhaus en climas europeos cálidos (Ford et al., 2007) que tiene en cuenta, tanto el clima como los temas mencionados anteriormente. Los criterios de demanda energética máxima en refrigeración y calefacción no deben superar los 15 kWh/(m²a) y el consumo de energía primaria para todos los servicios de energía no debe superar los 120 kWh/(m²a), igual como en la definición de Feist. Los puntos que difieren de la definición de Feist son:

- Estanqueidad: La envolvente exterior del edificio debe tener como resultado de la prueba de la presurización un valor de no más de 0,6 h-1. Para aquellos lugares con temperaturas ambiente de diseño en invierno por sobre los 0 °C, un resultado de la prueba de la presurización de 1,0 h-1 es generalmente suficiente para alcanzar el criterio de la calefacción.
- Confort en verano: La temperatura operativa del ambiente interior debe mantenerse en el rango especificado por la norma EN 15251. Además, si se usa un sistema activo de refrigeración, dicha temperatura puede mantenerse bajo los 26°C.

En el año 2008 un grupo de arquitectos e ingenieros españoles y alemanes formaron un grupo de trabajo, con el fin de promover las casas pasivas en España, mediante la adaptación del estándar Passivhaus alemán (Ruiz de Gauna, 2012) y fundaron para este fin la plataforma de edificación Passivhaus. La plataforma es una asociación sin fines de lucro dedicada a la promoción del estándar de casa pasiva en España (<http://plataforma-pep.org/>).

Schnieders investigó en un estudio teórico, la posibilidad de la implementación del estándar Passivhaus en climas mediterráneos del suroeste de Europa (Schnieders, 2009). El principal hallazgo es que, efectivamente, se pueden realizar edificios que proporcionan el bienestar térmico en invierno y en verano, alimentado con calefacción, refrigeración y/o deshumidificación del aire el cual es necesario para lograr una buena calidad del aire interior. En primer lugar, es importante señalar que según Schnieders, al igual que en Europa central, la calefacción de locales representa la demanda de energía dominante en la mayoría de los climas del Mediterráneo. A nivel europeo, la demanda anual de energía para enfriamiento residencial es todavía relativamente pequeña, pero, se esperan grandes demandas de energía, debido a que el sector de los dispositivos de aire acondicionado sigue en continua expansión.

Los puntos anteriores muestran con claridad, que el estándar Passivhaus, con su demanda energética baja y un clima interior alto, igualmente, presenta una buena oportunidad de realizar construcciones sustentables en climas no tan severos en invierno. Estos climas pueden ser los climas mediterráneos del suroeste de Europa o, por ejemplo, igualmente del centro sur de Chile.

1.4 El estándar Passivhaus en Chile

1.4.1 Estado de arte del estándar Passivhaus en Chile

El interés en eficiencia energética y en edificaciones sustentables aumentó en Chile durante los últimos años. Muchas Universidades ofrecen estudios de postgrado en la temática e integran la sustentabilidad también en el pregrado. Se aumentó, junto con este desarrollo, el interés en el estándar Passivhaus y ya existen algunos ejemplos construidos en Chile que cumplen con este estándar y sus criterios formulados para Europa central. A los congresos internacionales “Passivhaustagung” en Europa central asistieron, durante los últimos años, frecuentemente interesados de Chile, para informarse sobre el tema y ya se presentaron dos artículos sobre el desarrollo del estándar en Chile (Hatt et al., 2012; Huenchunir, 2011).

En Santiago de Chile se construyó en el año 2010 un edificio de banco (Huenchunir, 2011), certificado LEED Gold y en proceso de certificación Passivhaus. El edificio cumple con todas las características del estándar Passivhaus, menos la hermeticidad del aire la cual se está intentando mejorar para conseguir la certificación. Este edificio se nombra como ejemplo, en la guía del estándar Passivhaus de la comunidad de Madrid (Crespo et al., 2011).

Igualmente, en Santiago se construyó en el año 2011 un colegio, el Santiago College, en el cual las salas de clase cumplen con los criterios del estándar Passivhaus (Gardella, 2012).

No sólo en el sector de la construcción, sino que, igualmente, en el área de investigación, creció el interés en el estándar. Actualmente se ejecuta un proyecto financiado por el Gobierno de Chile sobre la factibilidad de la implementación del estándar Passivhaus en Chile. El proyecto FONDEF D09i1081: "Desarrollo e introducción del sistema de edificación pasiva en Chile" se presenta en estado de ejecución por la Universidad del Bío-Bío en Concepción durante los años 2011-2014 (Hempel et al., 2012). El presente trabajo forma parte de este proyecto de investigación del cual ya se presentó un avance en el congreso Passivhaus en Hannover (Hatt, et al., 2012). La meta del proyecto FONDEF es la implementación del estándar en el centro-sur del país, con las siguientes etapas: desarrollo teórico, construcción de un prototipo, monitoreo del prototipo, análisis de rentabilidad y difusión de los resultados.

Otro ejemplo, para un avance en el área de la investigación, es el trabajo de Carrasco. El realizó una investigación teórica sobre "Feasibility of Passivhaus standards and alternative passive design on climatic zones of Chile - Determination of energy requirements with dynamic Simulation." (Carrasco and Kokogiannakis, 2012).

Todos los puntos anteriores muestran un interés creciente en el estándar Passivhaus y su aplicación en Chile. Pero, todavía no existe ninguna plataforma o mesa redonda donde se juntan los interesados a nivel nacional, ni existe una definición del estándar completamente aceptada. Algunas de las preguntas que surgieron, y que forman parte del presente trabajo son: ¿Se puede implementar el estándar Passivhaus con sus criterios, sin adaptarlo a la situación nacional? ¿Qué significa el cumplimiento del estándar en criterios arquitectónicos y constructivos? ¿El estándar será rentable en Chile, con sus condiciones nacionales del mercado inmobiliario y energético?

1.4.2 Consideraciones generales

Garantizar el confort térmico: Con base en las observaciones de los puntos anteriores, sobre todo del capítulo sobre confort térmico, se puede concluir, que el ahorro de energía mediante la reducción del confort no es un modelo sostenible ni aceptado por los residentes. Por el contrario, el objetivo de todos los esfuerzos debe ser un aumento del confort y al mismo tiempo una reducción del consumo energético a un mínimo. El primer objetivo, por lo tanto, es el aseguramiento de un confort higrotérmico durante todo el año y, además, reducir el consumo energético a un valor económicamente razonable. No hay que olvidar que una edificación nos debe proteger de las principales influencias ambientales no deseadas. Históricamente, sólo a partir de estas necesidades se comenzaron a construir edificaciones y estas necesidades han aumentado con el tiempo y todavía aumentan hacia un mayor confort.

La implementación de un nuevo estándar energético en Chile debe significar una mejora en las cualidades y no un retroceso por lo que se plantea garantizar una temperatura agradable durante todo el año, por ejemplo 20°C en invierno y no 18°C, a pesar que estas últimas temperaturas se podrían lograr posiblemente con una menor inversión inicial. El confort es la meta fundamental. Se parte de la base que todas las personas desean tener un clima interior confortable (Feist, 2004) y por lo tanto, a largo plazo, ninguna solución, que no ofrezca un confort interior adecuado, sobrevivirá.

Además, en general, es el usuario el que determina la temperatura que desea, y no, la que ha sido establecida por cálculos teóricos. Por lo tanto, establecer un valor muy bajo no va a corresponder a la realidad, obligando a subir el valor y por lo tanto, el consumo energético no va a corresponder al monto indicado inicialmente al usuario. Esto puede producir una reacción negativa del usuario frente a las condiciones previamente indicadas.

Otra razón, por la que se recomienda establecer criterios exigentes durante todo el año y no una temperatura más baja en la noche, por ejemplo, es para generar un cierto margen de seguridad. Esta precaución es recomendable para crear una edificación térmicamente menos sensible frente a posibles fallas o errores en sistemas de climatización o daños en la construcción.

Por ese motivo se recomienda emplear en viviendas Passivhaus en Chile, las condiciones de confort descritas en el capítulo 1.1.2. Estas condiciones son ampliamente validadas y deben garantizar un confort higrotérmico adecuado.

Climatizar los recintos a través del sistema de ventilación: La idea original del estándar Passivhaus es la climatización de la edificación a través del flujo de aire según la definición de Feist: "Una edificación Passivhaus es un edificio en el que el confort térmico se puede garantizar sólo por calentamiento o refrigeración del flujo de volumen del aire fresco, el cual es necesario para una calidad del aire adecuada sin utilizar ayuda adicional al aire recirculado" (Feist, 2005).

Este punto es altamente válido para Chile por dos razones. La primera es que la mayoría de las viviendas en el centro sur de Chile, no cuentan con un sistema de climatización adecuado para garantizar un clima interior agradable. Estufas a gas y kerosén son ampliamente utilizadas, pero contaminan el aire interior de los recintos. Estufas a leña, igualmente, son ampliamente utilizadas, sobre todo en el sur, pero ellos contaminan el aire exterior y no calefaccionan todas las habitaciones, como por ejemplo los baños. Por esta razón, se pretende entregar al usuario, una edificación que incluya un sistema de climatización que logre un confort térmico sin contaminar los recintos interiores, sino más bien, que renueve el aire usado.

La segunda razón es, que las edificaciones las cuales cuentan con sistemas de calefacción central o con electricidad tienen gastos energéticos altos, como se mencionó en el punto 1.1.3. Además, una calefacción central significa una inversión inicial alta. Se pretende bajar los costos de inversión inicial en las casas Passivhaus como fue descrito en el punto 1.3.2, con la sustitución del sistema de calefacción central tradicional, por un sistema de ventilación. Se puede observar este fenómeno en la ilustración 1-10.

De acuerdo a lo argumentado anteriormente, se recomienda diseñar edificaciones Passivhaus en Chile de manera que puedan ser climatizadas a través del sistema de ventilación. Se aplica este criterio, más adelante en el presente estudio, como criterio necesario para cumplir el estándar Passivhaus.

Superficie útil por persona (m²/pers): En la certificación del estándar Passivhaus en Europa central se aplica generalmente un valor de 30 o 35 m² superficie útil por persona (Feist, et al., 2007).

Este valor no será muy real en una vivienda social en Chile, dado que, en este tipo de vivienda viven aprox. 4 a 5 personas en 50 m² de superficie, por lo tanto, serán aprox. 10 m²/pers lo que significa el triple del valor de la certificación en Europa. En la tabla 1-8, se pueden observar las superficies útiles por tipo de viviendas construidas en Chile entre 1995 y 2004. La superficie útil promedio varía en un rango amplio entre 257 m² y 33 m². Según la encuesta Censo 2002 (Instituto Nacional de Estadísticas (INE), 2002) el hogar promedio de los chilenos consta de 3,5 personas, por lo tanto, la superficie útil promedio varía por persona en un rango de 73 a 9 m².

En el presente estudio, se utiliza el valor promedio de las viviendas destinadas a los ingresos medios y altos lo que resulta con la ponderación por el número de las viviendas y con 3,5 personas por vivienda en 22 m²/pers superficie útil. Se eligió este segmento del mercado para el estudio dado por el precio total de las viviendas. Las viviendas Passivhaus tendrán un costo de construcción más elevado que una vivienda construida según la reglamentación térmica actual, por lo tanto, será hoy en día más difícil implementar este tipo de vivienda en los sectores socioeconómicos bajos que en los sectores medios o altos. Se considera, por lo tanto, en el estudio como base una vivienda del sector medio-alto con un precio de 2500 UF.

Tabla 1-8: Número de viviendas construidas anualmente, superficie útil y precio promedio separado por tipo de vivienda en el lapso 1995-2004 (Fuente: INE, 2004).

Tipo de Vivienda	Categoría	Promedio anual Construidas (viviendas)	Superficie Promedio (m ² /vivienda)	Precio Promedio (UF/vivienda)
Lujo	1	3.202	257	9.693
Ingresos Altos	2	15.973	118	3.146
Ingresos Medios	3	40.707	62	1.087
Vivienda Económica	4	36.511	44	432
SERVIU	5	26.242	33	305
TOTAL		122.635	-	-

Se recomienda diseñar y analizar el proyecto arquitectónico, el cual se pretende construir según el estándar Passivhaus en Chile, con la cantidad de personas previstas a vivir en la vivienda y no con el valor de 30 m² superficie útil por persona como es planteado por Feist et al., para tener en cuenta la gran diversidad de los hogares chilenos.

Ganancias internas: Para la certificación del estándar Passivhaus en Europa central se aplica, generalmente, el valor para las ganancias internas de 2,1 W por m² superficie útil (Feist, et al., 2007). Este valor es más bajo que los valores generalmente aplicados en cálculos energéticos, con el fin de no sobreestimar las ganancias internas. Se mostró en algunos estudios que este valor representa la situación real en casas Passivhaus en Europa central.

Con respecto al punto anterior sobre la superficie útil de las viviendas en Chile y con la misma argumentación, se observa, que la determinación de las ganancias internas a través de la superficie útil y no por cantidad de personas, posiblemente, no refleja completamente la realidad nacional. Dado que, una familia de 5 personas, por ejemplo, genera una cierta cantidad de ganancias internas, independiente de que viva en una vivienda de 50 m² o en una de 200 m². Se recomienda, por lo tanto, la determinación de las ganancias internas para el diseño de una casa Passivhaus por número de personas y no por superficie útil. Se pueden determinar las ganancias internas por persona con las condiciones formulados de Feist et al. según la siguiente ecuación.

$$(2,1 \text{ W/m}^2) * (30 \text{ m}^2/\text{pers}) = 63 \text{ W/pers} \quad (1.4)$$

Se recomienda determinar las ganancias internas para el análisis de una casa Passivhaus en Chile por cantidad de personas y no por superficie útil de la vivienda, dado que, existe una gran diversidad entre el tamaño de las viviendas chilenas. Se recomienda calcular con un valor de 63 W por persona y con una ocupación continua durante el día y el año.

Cantidad de aire por persona: Para garantizar una calidad de aire interior aceptable hay que renovar el aire permanente. Se considera en el marco de la certificación de edificaciones Passivhaus en Europa central un intercambio de aire de 20-30 m³/(h*pers.) y un intercambio mínimo necesario de 0,3 cambios de aire por hora (Feist, et al., 2007).

La norma alemana DIN 1946 pide 30 m³/(h*pers.), el consejo de la (ASHRAE 62, 1999) de los estados unidos, una ventilación para una calidad de aire aceptable en aplicaciones residenciales de aprox. 27 m³/(h*pers.). Bustamante considera, en su Guía de Diseño, para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social en Chile 20 m³/(h*pers.) (Bustamante, et al., 2009).

Se recomienda considerar un intercambio de aire de 30 m³/(h*pers.) y un intercambio mínimo necesario de 0,3 cambios de aire por hora (ACH) como es planteado por Feist, dado que, las necesidades de aire fresco por persona no cambian entre Europa central y Chile.

Potencia máxima posible de entregar para la climatización a través del flujo de aire:

Como se mostró en el capítulo 1.3.2 es posible entregar aprox. 10 W/m^2 de potencia máxima para la calefacción a través del flujo de aire, con las consideraciones de la certificación en Europa central. Asumiendo una superficie útil de 22 m^2 por persona para Chile resulta una potencia máxima de $13,6 \text{ W/m}^2$ en calefacción. Para el caso de refrigeración se obtienen una potencia máxima de $9,4 \text{ W/m}^2$ considerando una temperatura mínima permitida del aire de 5°C en el sistema de climatización. Se puede observar, que las potencias máximas posibles de entrega, cambian con la cantidad de personas y con la superficie útil de la edificación.

La recomendación en el caso de la potencia máxima posible de entregar para la climatización a través del flujo de aire, igualmente, es la consideración de la superficie útil del proyecto arquitectónico y la cantidad de personas y no la aplicación de un valor fijo. Así se puede tener en cuenta la diversidad de las viviendas chilenas.

Hermeticidad de la envolvente: Las razones por las cuales se le da importancia a la hermeticidad de la envolvente exterior, son para evitar daños interiores por condensación de humedad en los muros exteriores y para garantizar el confort de los usuarios al no producirse corrientes de aire o zonas de baja temperatura. Además se logra una mayor economía en gastos para calefaccionar al tener muros exteriores herméticos (Peper et al., 2005).

Por estas razones se requiere, para lograr el estándar Passivhaus en Europa central, una hermeticidad alta de la envolvente. La hermeticidad de la envolvente no debe ser mayor que 0,6 ACH con una diferencia de presión de ± 50 pascal. Tampoco se acepta infiltraciones locales con un gran flujo de aire. Así se evita un recinto no confortable por corriente de aire, pérdidas de energía por infiltración y daños por condensación dentro de la construcción (Krick, et al., 2011).

En regiones donde las temperaturas mínimas en invierno están sobre 0°C debiera ser suficiente un resultado de 1,0 ACH @50Pa para lograr el estándar según (Ford, et al., 2007). Schnieders formula, que para casas Passivhaus en climas mediterráneos se puede aceptar hasta un valor de 1,0 ACH @ 50Pa (Schnieders, 2009).

La recomendación para Chile en el marco del presente estudio es una hermeticidad alta de la envolvente, la cual se debe mostrar a través de un test de presurización "Blower Door". El resultado no debe superar los 0,6 ACH @50Pa en general y en climas con temperaturas mínimas de no menos de 0°C no debe superar los 1,0 ACH @50Pa.

Demanda energética máxima permitida para calefacción y refrigeración: Feist describe la demanda energética máxima de una edificación Passivhaus con las siguientes palabras: "Para Europa central surgen de la experiencia y de los cálculos con programas de simulación, valores para la demanda de calefacción, tales como, los comúnmente utilizados 15 kWh/(m²a) - pero sólo aproximadamente. En Estocolmo pueden ser 20, en Roma más parecido a 10 kWh/(m²a) " (Feist, 2005).

A partir de esta experiencia en Europa central, se estableció durante el tiempo la demanda máxima en refrigeración e igualmente en calefacción de 15 kWh/(m²a) para la obtención del certificado del estándar Passivhaus. Hoy en día este criterio es el más conocido y el más utilizado ampliamente en el mundo para clasificar el estándar Passivhaus, aunque en varias condiciones climáticas todavía sin una aprobación científica. A partir de esta realidad surgió una investigación en el Instituto Passivhaus en Darmstadt en el año 2011, para aclarar los criterios en diferentes situaciones climáticas a nivel mundial. Con el criterio de calefaccionar a través del aire se puede estimar según (Rongen and Schnieders, 2011) una demanda en calefacción en las casas Passivhaus en relación a la temperatura exterior promedio del año. Esta correlación se muestra en la siguiente ecuación.

$$Q_c \leq 20 - 0,5 * T_{pa} \quad (1.5)$$

Con:

$$Q_c = \text{Demanda de energía para calefacción [kWh/(m}^2\text{a)]}$$

$$T_{pa} = \text{Temperatura anual promedio [}^\circ\text{C]}$$

Con esta correlación resulta una demanda energética máxima para Puerto Montt de 14,9 kWh/(m²a) y para Santiago de 12,9 kWh/(m²a). Rongen y Schnieders no publicaron una correlación para estimar la demanda energética máxima en refrigeración.

Se pretende investigar, en el marco del presente estudio, las demandas energéticas en calefacción y refrigeración de edificaciones Passivhaus en el centro-sur de Chile, dado que, no existe una experiencia amplia en la construcción de dichas edificaciones en el contexto nacional. Tal cual, como dijo Feist, depende la demanda energética en refrigeración y calefacción del clima donde se construyera la casa Passivhaus. Se pretende investigar por lo tanto, que si el valor máximo ampliamente utilizado de 15 kWh/(m²a), tiene validez para la demanda energética en refrigeración y calefacción en edificaciones Passivhaus en el centro sur de Chile, siempre respetando la definición de Feist de la posibilidad de climatizar las casas a través del flujo de aire.

Consumo de energía primaria total: El consumo de energía primaria para todos los servicios de energía, incluyendo calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria, electrodomésticos e iluminación, no debe exceder a 120 kWh por m² superficie habitable y año para lograr la certificación de una edificación Passivhaus en Europa central. Esto debido a varias razones con visión futura como son el incentivo al uso de energías renovables y al uso de artefactos eléctricos que garanticen un ahorro energético.

La meta para Chile también será un consumo de energía primaria total bajo, lo que se puede lograr, por ejemplo, por el uso de instalaciones solares térmicas, que el Estado chileno ya bonifica. También se ofrecen en el mercado chileno artefactos como refrigeradores certificados en cuanto a su eficiencia energética. Deberían instalarse en las casas Passivhaus solamente artefactos clasificados en las clases A o A+.

En el presente estudio no se pretende establecer valores máximos del consumo de energía primaria total para Chile ya que está focalizado en la determinación de las demandas energéticas y el comportamiento de la envolvente exterior. Eso sí, se recomienda no sobrepasar el valor de 120 kWh/(m²a) en consumo de energía primaria para todos los servicios de energía, incluyendo calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria, electrodomésticos y iluminación.

El consumo de energía primaria total es un indicador importante para medir el impacto medioambiental y para estimar la emisión de CO² de una edificación durante su vida útil y debería mantenerse lo más bajo posible.

1.4.3 Resumen de las condiciones bordes

En el marco del presente estudio se aplican las siguientes condiciones y valores bordes para investigar el comportamiento de edificaciones Passivhaus en el centro-sur de Chile. Los valores tienen sus orígenes en las explicaciones del presente capítulo 1 y se muestran a continuación en la tabla 1-9.

Tabla 1-9: Condiciones bordes para el estándar Passivhaus en Chile en el marco del presente estudio (elaboración propia).

	Valor	Observación
Temperatura de cálculo interior mínima invierno	T_{\min} : 20°C	Según capítulo 1.1.2, (durante los 24 horas)
Temperatura de cálculo interior máxima en verano	T_{\max} : 26°C (si $T_{\text{ext}} > 32^\circ\text{C}$ $T_{\max} = T_{\text{ext}} - 6^\circ\text{C}$)	Según capítulo 1.1.2, (durante los 24 horas)
Volumen de aire exterior por persona	30 m ³ /(h*persona) (mínimo 0,3 ACH)	Según capítulo 1.1.2, (durante los 24 horas)
Superficie útil por persona	22 m ² / persona	Según capítulo 1.1.2
Ganancias internas	63 W / persona	Según capítulo 1.1.2, (durante los 24 horas)
Hermeticidad n ₅₀ de la envolvente:	0,6 o 1,0 ACH@50Pa	Según capítulo 1.1.2 (0,6 o 1,0 en dependencia a la temperatura mínima exterior)
Potencia máxima posible para calefacción a través del aire	13,6 W/m ²	Según capítulo 1.1.2
Potencia máxima posible para enfriamiento a través del aire	9,4 W/m ²	Según capítulo 1.1.2
Demanda energética máxima para calefacción	A determinar en el marco del presente estudio	Según capítulo 1.1.2
Demanda energética máxima para refrigeración	A determinar en el marco del presente estudio	Según capítulo 1.1.2
Consumo de energía primaria total: (calefacción, refrigeración, agua sanitaria caliente, iluminación, electricidad)	120 kWh/(m ² a)	Según capítulo 1.1.2, es una recomendación y no materia del presente estudio

CAPÍTULO
2.

DETERMINACIÓN DE LA METODOLOGÍA
DEL ESTUDIO PARAMÉTRICO

2 Determinación de la metodología y de los métodos para el estudio

2.1 Determinación de la metodología

2.1.1 Objetivos propuestos a lograr con el estudio

Con los resultados del estudio, se pretende orientar, al arquitecto o ingeniero en el proceso del diseño de una casa Passivhaus en Chile, además, ofrecer información sobre el comportamiento de casas pasivas, desde el punto de vista de la demanda energética, del confort térmico y de la rentabilidad económica.

En el marco de esta investigación, se crea una base teórica para facilitar la implementación del estándar Passivhaus en Chile, dado que no existe información generalizada. En muchos países, al igual que en Chile, no existe experiencia previa en la realización de casas pasivas como se ha desarrollado en Europa central. Por lo tanto, el proceso de diseño de una vivienda Passivhaus, sin tener información previa, es un proceso de prueba – error, a través del análisis del balance energético de la vivienda. Por lo tanto, esto implica que hay que cambiar una parte del diseño, analizar el balance energético, comprobar si cumple con el estándar, y si no lo cumple, se debe repetir el proceso. Estos procesos de iteración requieren, en general, de un tiempo prolongado de ejecución, dado que el cambio de un parámetro influye en los otros parámetros, puesto que los parámetros, generalmente, no son independientes. Un ejemplo de dos parámetros no independientes es la superficie vidriada y la configuración de los vidrios, como por ejemplo: vidrio simple o termo panel. Con un vidrio termo panel se puede agrandar la superficie vidriada, en comparación, a un vidrio simple sin aumentar la demanda energética en calefacción.

Con el estudio se pretende aclarar específicamente los siguientes puntos:

- Determinar los límites de la demanda energética de casas pasivas en Chile.
- Determinar la demanda energética en calefacción de una casa pasiva en el centro-sur de Chile.
- Determinar, si es necesario, refrigerar casas Passivhaus en el centro sur de Chile y determinar esta demanda energética en refrigeración.
- Determinar la influencia, de los diferentes parámetros estudiados, en el cumplimiento del estándar y de la demanda energética en calefacción y refrigeración.
- Determinar la influencia, de diferentes zonas climáticas, en el estándar y proponer soluciones para lograr el estándar.

- Determinar los valores recomendados de la transmitancia térmica de los tipos de ventanas.
- Determinar la diferencia de la demanda energética entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia, según reglamentación térmica vigente (MINVU, 2006).
- Determinar la diferencia de costos de construcción y de operación, entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia, según reglamentación térmica vigente.
- Analizar la rentabilidad económica del estándar Passivhaus, en comparación a los respectivos casos de referencia, según reglamentación térmica vigente.
- Analizar el tiempo de recuperación, de los costos iniciales más elevados, de los casos de estudio en comparación a sus respectivos casos de referencia.

2.1.2 Metodología propuesta para lograr los objetivos

En el marco del estudio, se analizan múltiples parámetros, tales como: orientación, ubicación, superficies vidriadas, tipo de ventanas, transmitancia térmica de elementos opacos, entre otros. Dado que los parámetros, no son independientes, se propone como metodología, un estudio multifactorial y no, un estudio paramétrico simple. Puesto que, con un estudio multifactorial, se pueden analizar todas las combinaciones posibles entre los parámetros y sus niveles estudiados. La ventaja de esta metodología es que se pueden analizar, de este modo, el impacto y la influencia de los parámetros y sus niveles dependientes.

Si la variable de respuesta muestra una correlación lógica con un parámetro, no es necesario aplicar la metodología de un estudio multifactorial. Por ejemplo: la variable de respuesta será la demanda energética en calefacción y el parámetro variado será la transmitancia térmica del muro. Claramente, la demanda en calefacción, desciende con una reducción de la transmitancia térmica del muro. En muchos casos, no hay una correlación tan obvia, y menos, cuando existen varias variables de respuesta, como las que se señalan, en el presente estudio, tales como: la demanda energética en calefacción y refrigeración y la rentabilidad económica. No obstante, de acuerdo a lo señalado anteriormente, la transmitancia térmica posee una correlación lógica con la demanda energética en calefacción. Por ende, si se aumenta la transmitancia, desciende la demanda energética, pero ¿Qué pasa si se analiza como variable de respuesta la rentabilidad económica? Sólo, hasta un cierto punto será rentable aumentar la aislación térmica. Con otro aumento adicional no se recuperará necesariamente la inversión inicial a través del ahorro en gastos para energía. Esta es una correlación no lineal.

(Tuhus-Dubrow and Krarti, 2010) argumentan de, si se cambia solo un parámetro mientras se fijan los otros, existe un riesgo de no tomar en cuenta algunos efectos interactivos importantes entre los parámetros, sobre todo, cuando se introducen factores económicos y de la rentabilidad.

(Hasan et al., 2008) utilizó un estudio multifactorial para minimizar los costos del ciclo de vida, dado que, un estudio paramétrico simple, según él, no es la opción apropiada. En un estudio paramétrico simple, el diseñador propone una solución, luego, ejecuta una simulación térmica y finalmente, afina su propuesta. Este proceso, por una parte, es muy ineficiente en tiempo de ejecución y por otra parte, no expresa con claridad la relación entre los parámetros, lo que dificulta su interpretación, y sobre todo, cuando se pretenden estudiar varios parámetros al mismo tiempo, por la no linealidad del problema.

Otros autores, como (Bourisli and AlAnzi, 2011; Ellis et al., 2006) se refieren de la misma manera al tema, y proponen un estudio multifactorial, para abordar la optimización del diseño en edificaciones.

Para responder a los objetivos, se define la metodología a seguir con el estudio multifactorial, de acuerdo a las siguientes etapas:

- Definición y validación del método de cálculo.
- Definición de los parámetros y sus rangos.
- Definición de las condiciones límites y de los input.
- Definición de los casos de referencia.
- Definición de los resultados esperados y de los output.
- Ejecución de las simulaciones multifactoriales.
- Análisis de los resultados.
- Conclusiones y consideraciones.

Se analiza el comportamiento térmico, de múltiples casos de estudio, en diferentes climas del centro – sur de Chile, específicamente, en Santiago, Concepción y Puerto Montt. Para cada caso de estudio se analiza, adicionalmente, un respectivo caso de referencia, con el fin de determinar el ahorro energético entre una casa Passivhaus y una casa construida según reglamentación térmica vigente (MINVU, 2006).

Los resultados obtenidos de las simulaciones térmicas multifactoriales para cada caso de estudio y su respectivo caso de referencia, son los siguientes:

- Posibilidad (Si/No) de climatizar con el flujo de aire exterior, sin utilizar aire recirculado.
- Demanda energética para calefacción en kWh/(m²a) para los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia.

- Demanda energética para refrigeración en kWh/(m²a) para los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia.
- Demanda energética total (suma de refrigeración y calefacción) en kWh/(m²a) para los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia.
- Diferencia en los costos de construcción y de la operación para los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia (costos del ciclo de vida).
- Rentabilidad económica de los casos de estudio en comparación a sus respectivos casos de referencia.
- Tiempo de recuperación de los costos iniciales más elevados de los casos de estudio en comparación a sus respectivos casos de referencia.

2.1.3 Definición del cumplimiento del estándar Passivhaus

Tal como se menciona en el capítulo 1, la definición del estándar Passivhaus es según (Feist, 2005): "Una casa pasiva es una edificación en la que el confort térmico se garantiza sólo por calentamiento o refrigeración del flujo de aire externo que ingresa, de acuerdo al volumen de intercambio requerido para la calidad del aire interior, sin utilizar ayuda adicional al aire recirculado."

Por lo tanto, los casos que cumplen con el estándar Passivhaus, son sólo los que se puedan climatizar por el calentamiento o refrigeración del flujo de aire exterior necesario, si no, no lo cumplen. Esta definición nace de la idea de reducir las pérdidas de calor hasta tal punto, que no se requiere más que climatizar sólo con el pre tratamiento del aire exterior que se inyecta a la casa. Por lo tanto, no se requiere, de un sistema de calefacción central y, además, se puede ahorrar esa inversión inicial y así, cubrir los costos, más elevados, tales como: aislación térmica, de un sistema de ventilación y de ventanas de mejor calidad.

Para clasificar los casos, se puede utilizar el número de horas del año, en las cuales, el sistema de climatización no logra el confort térmico deseado. Por ejemplo: Si la temperatura de confort interior deseada en invierno es de 20° C, se suman el número de horas del año donde la temperatura es inferior a 20° C. En estas horas, el sistema de climatización no es capaz de lograr el confort deseado, puesto que, los sistemas de ventilación sin recirculación, tienen una potencia limitada. De acuerdo, a las condiciones descritas en el capítulo 1, se puede lograr una potencia máxima en refrigeración de 9,4 W/m² y en calefacción de 14 W/m² con una climatización, a través del flujo de aire exterior. 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, similar al rango de potencia máxima de un secador de pelo manual.

2.2 Métodos para predecir el comportamiento energético-térmico de una edificación

2.2.1 Simulaciones térmicas dinámicas y métodos simplificados

Antiguamente, antes de los años 60, sólo existían métodos simplificados de cálculo manual, para estimar el uso de energía en edificaciones (Van der Veken et al., 2004). Comúnmente, el método de los grado días para estimar el consumo energético de edificaciones, era el método utilizado. Estos métodos simplificaron, o bien, no tomaron en cuenta, algunos factores importantes, tales como: la masa térmica, entre otros. A mitad de los años 60, aparecieron métodos de simulaciones térmicas, que tomaron el clima como una variable independiente, y a mitad de los años 70, se incorporó el sistema de climatización y ventilación en los modelos de simulación. No obstante, este desarrollo, sólo fue posible por el incremento de las capacidades de los sistemas computacionales.

Hoy en día, los programas de simulaciones térmicas son ampliamente conocidos y validados. Los resultados representan la realidad, con una exactitud suficiente, para el diseño o la certificación energética de edificaciones, como ya señalado por varios autores, como por ejemplo (De Meulenaer et al., 2005). Algunos ejemplos de los programas son: BLAST, BSim, DeST, DOE-2.1E, ECOTECT, Ener-Win, Energy Express, Energy-10, EnergyPlus, eQUEST, ESP-r, IDA ICE, IES/VES, HAP, HEED, PowerDomus, SUNREL, Tas, TRACE y TRNSYS (Crawley et al., 2008).

Por otra parte, se afinaron los métodos simplificados, los cuales se utilizan ampliamente en diferentes sistemas de certificación a nivel mundial. Un ejemplo de un método simplificado es el método descrito en la norma actual EN ISO 13790:2008-09: "Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling" la cual reemplaza la norma EN 832:2003-06. Los métodos simplificados entregan, para muchas aplicaciones, resultados con una exactitud suficiente y con la ventaja de ingresar los datos en un tiempo reducido, lo que significa menos tiempo de trabajo. Algunos autores como (Kalema et al., 2008; Kokogiannakis et al., 2008) señalan, que los métodos simplificados, pueden alcanzar un gran margen de error en edificaciones no convencionales, tales como casas livianas o casas de muy bajo consumo energético. Además, presentan problemas en la determinación de la demanda energética en refrigeración y en el análisis de riesgo del sobrecalentamiento en verano.

En la tabla 2-1, se observa una comparación de algunas propiedades de los programas de simulación térmica, versus los métodos simplificados.

Tabla 2-1: Comparación de algunas propiedades de programas de simulación térmicas versus métodos simplificados (elaboración propia).

Simulación dinámica	Métodos simplificados
Resultados relativamente exactos	Resultados con un margen de error
Resultados confiables en distintas situaciones climáticas	Necesidad de adaptar algunos factores a las distintas situaciones climáticas, como por ejemplo el grado de utilización de las ganancias
Extenso en tiempo y trabajo	El análisis requiere generalmente menos tiempo de trabajo
La posibilidad de errores aumenta con el aumento de la complejidad	Generalmente menos susceptible a errores
Requiere numerosos datos de input	Requiere menos datos de input
El software requiere, generalmente, de un periodo de evaluación de práctica en el uso y un conocimiento previo.	Uso menos complejo
Posibilidad de un análisis muy profundo de distintos fenómenos en el comportamiento energético - térmico	Posibilidades limitadas del análisis
Requiere un alto rendimiento de los equipos computacionales (hoy en día generalmente no presenta problemas)	No se necesitan computadores con características especiales

2.2.2 Software de cálculo de casas pasivas (PHPP) como método simplificado especialmente para la planificación de edificaciones Passivhaus

Un ejemplo de un método simplificado, es el programa de cálculo de casas pasivas: Passivhaus Projektierungs Paket PHPP V2007 (Feist, et al., 2007). En 1998 se desarrolló el software de cálculo PHPP basado en MS Excel, que posibilita un cálculo sencillo, por parte de técnicos poco especializados, y desde entonces, se ha ido actualizando. El PHPP está basado, en parte, en las norma EN 832 y EN 13790.

El PHPP es el Passivhaus Projektierungs Paket, nombre germánico para el programa imprescindible de simulación energética del edificio en la fase del proyecto (Wassouf, 2008). Traducido al castellano, significa "Paquete para proyectar casas Passivhaus". Es un programa informático, el cual se basa, en calcular mes a mes el comportamiento térmico de un edificio. Este programa ha sido desarrollado por el Passivhausinstitut Darmstadt y adaptado a la tipología específica de este estándar. Por lo tanto, es una herramienta básica, para los

arquitectos e ingenieros que diseñan casas Passivhaus. El programa, está formado, por hojas de cálculo Excel de fácil manejo. Está calibrado en programas de simulación dinámica, pero sin la gran complejidad de estos últimos. Es muy importante trabajar con el PHPP desde la fase del anteproyecto, e ir acompañando el proceso del proyecto para asegurarse del funcionamiento térmico del edificio. En la ilustración 2-1, se muestra el procedimiento para el cálculo de la demanda energética y de la carga térmica con el PHPP.

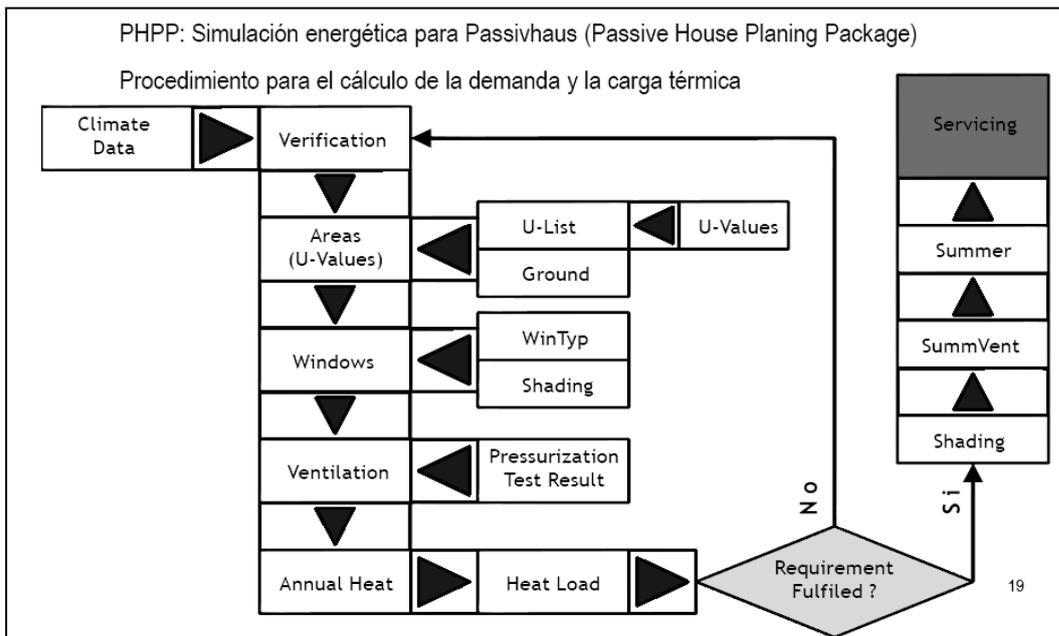


Ilustración 2-1: Procedimiento para el cálculo de la demanda y la carga térmica con PHPP (ENERGIEHAUS, 2009).

El PHPP no se ha desarrollado principalmente para la certificación (Feist, et al., 2007). El PHPP es, más bien, una herramienta de planificación para los arquitectos e ingenieros para optimizar el diseño de una casa pasiva. El PHPP contiene ayudas de diseño para las ventanas (en términos de confort), el sistema de ventilación (en términos de calidad óptima del aire) y para los sistemas de climatización. El PHPP trata toda la casa como una unidad, incluyendo la ventilación y los sistemas de climatización. El manual del PHPP no está limitado a la explicación de los datos de entrada para la hoja de cálculo, sino que contiene numerosos consejos para un diseño óptimo de los componentes (hermeticidad, puentes térmicos y reducción de los costos) y para el control de la calidad.

El PHPP es validado para Europa central en numerosos estudios, tales como (Schneider and Hermelink, 2006). En la ilustración 2-2, se muestra una comparación de los resultados de cálculo con el PHPP y los valores obtenidos por el monitoreo de 11 viviendas y departamentos en Alemania y en Austria. Se observa que los resultados se encuentran dentro de un rango de error tolerable.

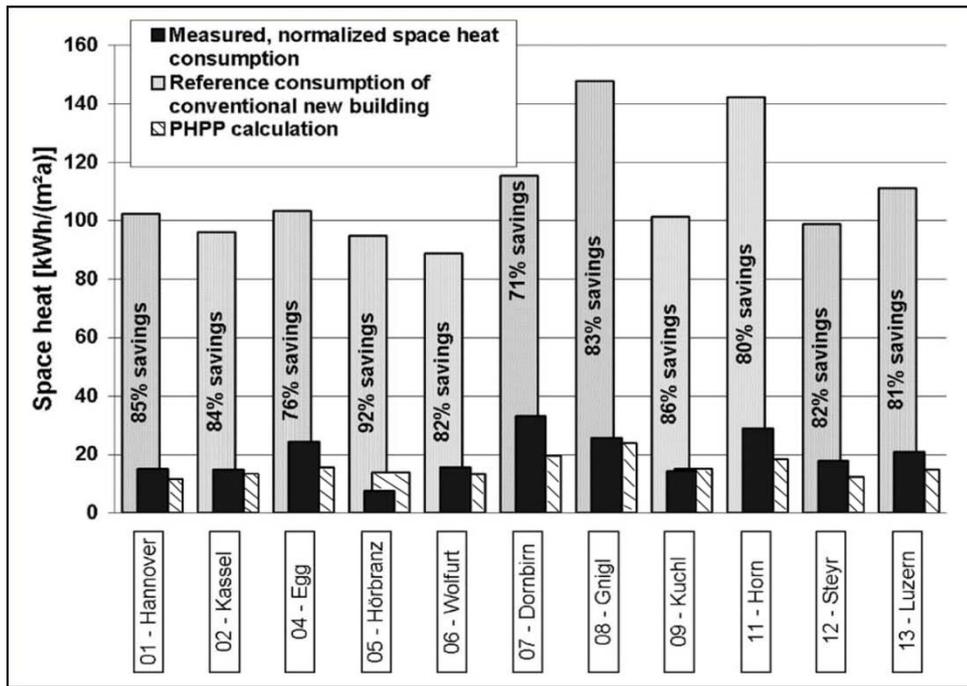


Ilustración 2-2: Comparación entre valores reales, valores calculados con PHPP y valores teóricos de una edificación tradicional (Schnieders and Hermelink, 2006).

Estos resultados tienen una correlación bastante similar con la realidad, dado que, se desarrolló el PHPP, sistemáticamente, mediante la comparación y adaptación del grado de la utilización de las ganancias, con los resultados de simulaciones dinámicas (Passipedia, 2010). Aquí, se han utilizado, sólo modelos de simulación, que han sido previamente validados, a través de un monitoreo de viviendas pasivas construidas. El ajuste y la adaptación se hicieron para las casas pasivas, es decir, para edificaciones que tienen una demanda en calefacción muy baja. En este aspecto, el cálculo con el PHPP difiere un poco de la norma internacional ISO 13790.

Como se ha descrito anteriormente, existe una amplia validación y adaptación del PHPP para Europa central. Por consiguiente, para utilizar el PHPP, en el hemisferio sur, se tienen que adaptar los datos climatológicos y cambiar las fachadas sur y norte en el cálculo, dado que, el software está confeccionado para el hemisferio norte.

Sobre la validez de los resultados del PHPP en el sur de Latinoamérica, no existen experiencias previas publicadas y científicamente validadas, por lo tanto, en ocasiones, es necesario adaptar los factores de la utilización de las ganancias y calibrar el método con simulaciones dinámicas para validar los resultados, a través de una comparación con valores obtenidos de un monitoreo.

2.2.3 El software EnergyPlus como ejemplo de un programa de simulaciones térmicas dinámicas

EnergyPlus (E+) es un programa de simulación térmica y energética para edificios, desarrollado por DOE (Department of Energy, Estados Unidos), su primera versión fue en el año 2001. Con este programa, se pueden realizar estudios de demanda y consumo energético. La versión revisada y utilizada en el estudio es la Versión 6.0.0 Build 023 del año 2010 (EnergyPlus, 2010).

Con el programa se pueden realizar simulaciones energéticas de calefacción, refrigeración, iluminación, ventilación y otros flujos energéticos en edificios. Este programa, está basado en las características y capacidades más populares de BLAST y DOE-2, además, incluye capacidades de simulación muy innovadoras, tales como: pasos de simulación inferiores a una hora, sistemas modulares y plantas integradas con balances basados en zonas, flujos de aire multizona, confort térmico y sistemas fotovoltaicos.

EnergyPlus es un código modular, estructurado sobre la base de las características y las capacidades más populares de BLAST y DOE-2.1E (Crawley, et al., 2008). Es un motor de cálculo que utiliza archivos de texto en modo input y output. Las cargas calculadas (por cálculo de balance de calor) en un tiempo especificado por el usuario (15-min por defecto) se pasan al módulo de simulación de los sistemas mecánicos del edificio, en el mismo tiempo. El módulo de simulación de sistemas de EnergyPlus, con un intervalo de tiempo variable, calcula sistemas de calefacción, refrigeración, plantas y sistemas eléctricos. Esta solución integrada, proporciona la predicción de la temperatura del espacio, más exacta, esencial para el diseño del tamaño del sistema y de la planta y para los cálculos del confort de los ocupantes. La simulación integrada, también, permite a los usuarios evaluar el control similar de la realidad del sistema, la absorción y desorción de humedad en los elementos de construcción, sistemas de refrigeración y calefacción radiantes y del flujo de aire entre zonas.

El motor de cálculo EnergyPlus, cuenta hoy en día, con múltiples interfaces gráficas y programas adicionales, los cuales facilitan su manejo. El programa se puede descargar de forma gratuita de la página del “Department of Energy, Estados Unidos”. Los programas adicionales e interfaces gráficas, se pueden descargar libremente o bien se pueden obtener por medio de licencias comerciales. Algunas de las interfaces gráficas, entre otras, son: Design-builder, OpenStudio plugin, CYPE-Building Services, EFEN, EPlusInterface y Hevacomp Design Simulation. Desde el año 2011, existe la “OpenStudio Application Suite”, la cual es una colección de diferentes aplicaciones gratuitas para facilitar el manejo del programa EnergyPlus.

El software EnergyPlus ha sido ampliamente validado, a lo largo de los años. Algunas referencias son (EnergyPlus, 2010; Henninger and Witte, 2010)

En la ilustración 2-3, se muestra, como ejemplo, el resultado de la comparación del consumo en calefacción de una casa, en Canadá, con un bajo consumo energético, entre la simulación térmica con EnergyPlus y los valores obtenidos del monitoreo según (O'Brien et al., 2010). El monitoreo se realizó durante los primeros 5 meses del año del 2010 y se puede observar, que los resultados de la simulación son similares a los del monitoreo.

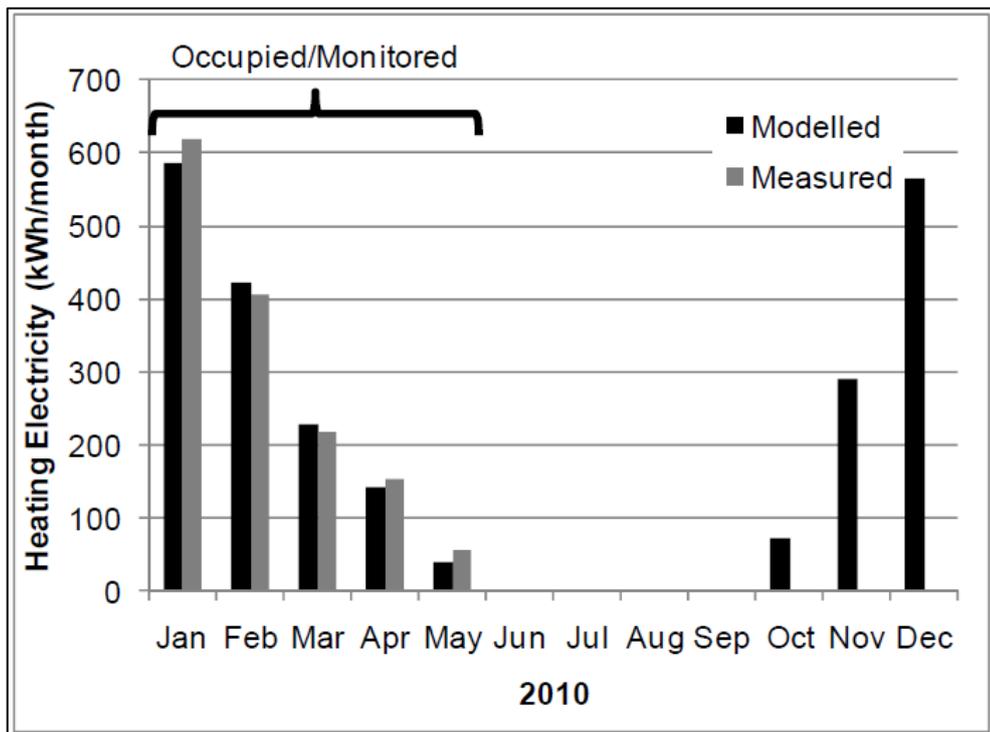


Ilustración 2-3: Comparación entre los resultados de la simulación térmica con EnergyPlus y los valores del monitoreo según (O'Brien, et al., 2010) en una casa con un bajo consumo energético.

2.3 Determinación del método a utilizar para la predicción del comportamiento energético-térmico

2.3.1 Requisitos generales con los cuales debe cumplir el método

Como se menciona en el capítulo 2.1, se pretende ejecutar, un estudio multifactorial, sobre el comportamiento de una casa Passivhaus, que cuenta con un consumo energético muy bajo, en tres climas distintos de Chile. Para ejecutar el estudio, se requiere un método de cálculo del comportamiento térmico que cuente con las siguientes propiedades:

- Entrega de resultados exactos *y similares a la realidad* para Chile.
- Capacidad de calcular casas que tengan muy bajo consumo energético.
- Posibilidad de incorporar sistemas de ventilación con recuperación de calor e intercambiadores de calor subsuelo-aire.
- Posibilidad de automatizar los cálculos para la realización del estudio multifactorial.

Se prefiere, generalmente, el método simplificado PHPP, dado que es altamente validado para cálculos de casas pasivas y, además, es de fácil manejo. Los dos métodos descritos anteriormente, PHPP y EnergyPlus cuentan, con una posible excepción, con respecto a las propiedades requeridas: no hay una validación del método simplificado PHPP para Chile y, además, no hay información sobre la exactitud de sus resultados.

Para evaluar, la validez de los resultados de los dos métodos, se realiza una comparación entre el PHPP y el EnergyPlus. En una primera etapa, se calcula con los dos métodos, el comportamiento energético de una casa imaginaria, ubicada en la ciudad de Múnich en Alemania. Se plantea la validez de los resultados del PHPP, por ser calibrado al clima de Europa central, como se ha descrito en el capítulo 2.2.2. Los resultados calculados con E+ siempre deberán ser similares, si el modelo fue ingresado correctamente. Este método, tiene la ventaja de la verificación y del control de los datos ingresados, en ambos programas.

En la segunda etapa, se comparan los resultados calculados, a través de los dos métodos, en tres climas distintos del centro-sur de Chile. Basándose, en el análisis de la comparación de los resultados se elige el método adecuado para el estudio multifactorial.

El objetivo del presente sub capítulo, es la validación del método y del modelo utilizado en el estudio paramétrico, para tener resultados representativos.

2.3.2 Datos meteorológicos para la realización de los cálculos

Para el análisis del comportamiento energético de una edificación, se necesita información sobre el lugar y las condiciones climatológicas, durante el año. La cantidad de información necesaria, depende del método de cálculo utilizado. El PHPP, por ejemplo, realiza el análisis en etapas mensuales, lo que, significa que se requiere de la información meteorológica para cada mes del año. Con los programas de simulación térmica, se analiza, generalmente, cada hora del año, lo que implica, la necesidad de obtener 8760 datos para un análisis de un año. Para cada etapa en el tiempo, sea anual, mensual o por hora, se requiere la información sobre las condiciones del ambiente tales como: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, radiación solar, grado de nubosidad entre otros.

En algunos países, como por ejemplo, en Alemania, existe un año meteorológico de referencia (AMR) para sus distintas regiones, el cual representa el comportamiento del clima en un lugar a largo plazo y ofrece generalmente valores por hora.

En Chile, no existe una AMR con valores por hora, pero sí, existe la información meteorológica en el formato mensual publicado en la norma NCh. 1079 Of.2008: "Arquitectura y Construcción – Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico" (NCh1079 of, 2008). El servicio meteorológico de Chile, posee, una base de datos, con valores por hora de diferentes estaciones meteorológicas, pero a estos datos, no fue posible acceder para la ejecución de la tesis, por motivos económicos.

A parte de los valores accesibles públicamente, también, existe la posibilidad de crear datos con algoritmos matemáticos. Un software para la creación de datos meteorológicos, es el programa Meteonorm (Meteotest, 2010). Meteonorm posee una base de datos incorporada, y se pueden ingresar datos personalizados, para aumentar la exactitud. Se pueden crear datos meteorológicos, a través, de una vinculación de los datos, de los lugares más cercanos, para cualquier lugar en el mundo. Estos datos creados se pueden exportar en distintos formatos, como por ejemplo, para los programas PHPP o EnergyPlus.

Datos creados con algoritmos matemáticos, generalmente, no ofrecen la exactitud de datos reales obtenidos de una medición, por lo tanto, conviene siempre si es posible, el uso de datos reales. Para realizar el presente estudio, no fue posible conseguir datos reales, como se describe anteriormente, por lo tanto se utilizaron datos creados con Meteonorm versión 6.1 en base a la norma (NCh1079 of, 2008).

Los datos creados con Meteonorm, no tienen la misma exactitud de los datos reales, pero según (Remund, 2009) una exactitud suficiente, para el cálculo de la demanda energética de un edificio. El uso de datos de Meteonorm es común en la comunidad científica en el área del análisis energético en Chile, por la falta de datos reales (Bustamante, 2008; Krämer, 2009; Krämer and Nordsieck, 2009; Méndez and Bardi, 2009).

Para la creación de los datos se aplicó el siguiente procedimiento:

- Ingresar datos mensuales de la (NCh1079 of, 2008) al Software Meteonorm V6.1.
- Crear datos requeridos por hora y mensuales. Para el cálculo de la potencia de calefacción y refrigeración en el PHPP se utiliza el escenario del caso extremo.
- Exportar datos en los formatos PHPP y EnergyPlus para los cálculos.

En la siguiente comparación, se utilizan los datos meteorológicos de la misma fuente (Meteonorm) para los dos programas PHPP y EnergyPlus. Esta metodología, tiene la ventaja de que posibles diferencias en los resultados no deben tener su origen en los datos meteorológicos utilizados.

2.3.3 Comparación de los resultados calculados con el PHPP y EnergyPlus para un caso ubicado en Múnich

No se espera, que los resultados de los dos métodos PHPP y E+ sean numéricamente iguales, dado que, los dos métodos, usan algoritmos de cálculo diferentes. Pero sí, se esperan resultados parecidos, dentro de un margen de error, siempre cuando se utilizan las mismas condiciones bordes las cuales están descritas anteriormente.

Para la comparación, se analiza un modelo de una casa simplificada con una planta de 10m por 10m, una altura de 2,5m y una techumbre plana. La fachada principal tiene una orientación hacia el ecuador, una superficie vidriada de un 60% y cuenta con un alero de 1,5m de ancho. En la ilustración 2-4, se puede observar el esquema de la casa con sus medidas y, en la tabla 2-2, se muestran las condiciones bordes para el análisis.

Se analiza la casa como una zona térmica, lo cual entrega resultados en el rango de la exactitud requerida sobre la demanda energética global de la casa. Las diferencias en los resultados, en la demanda energética de una casa Passivhaus modelada con una o varias zonas térmicas son mínimas, dado que, por la calidad de la envolvente y por el sistema de ventilación, no existe, una gran diferencia de temperatura entre los distintos recintos de una casa pasiva (Feist, et al., 2007).

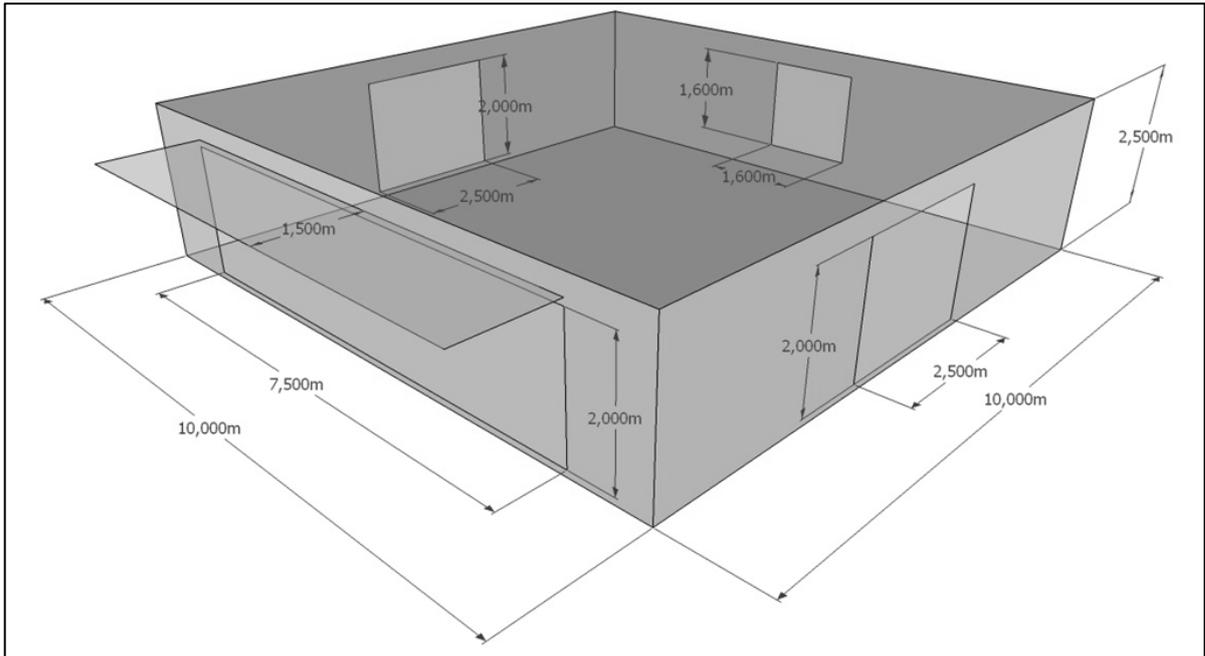


Ilustración 2-4: Modelo de simulación para comparar resultados entre E+ y PHPP (elaboración propia).

Una casa construida según el estándar Passivhaus cuenta con un sistema de ventilación para garantizar el intercambio de aire necesario. Este sistema de ventilación, puede tener, adicionalmente, un intercambiador de calor aire-aire y un intercambiador de calor subsuelo-aire para minimizar la demanda energética. En la ilustración 2-5, se muestra un esquema de un sistema de ventilación utilizado en una casa Passivhaus. Este sistema de ventilación, cuenta adicionalmente con un calefactor de aire, para calefactar la casa, y con un sistema de enfriamiento, para acondicionar el aire en verano. En este esquema, falta la opción de enfriar el aire en verano.

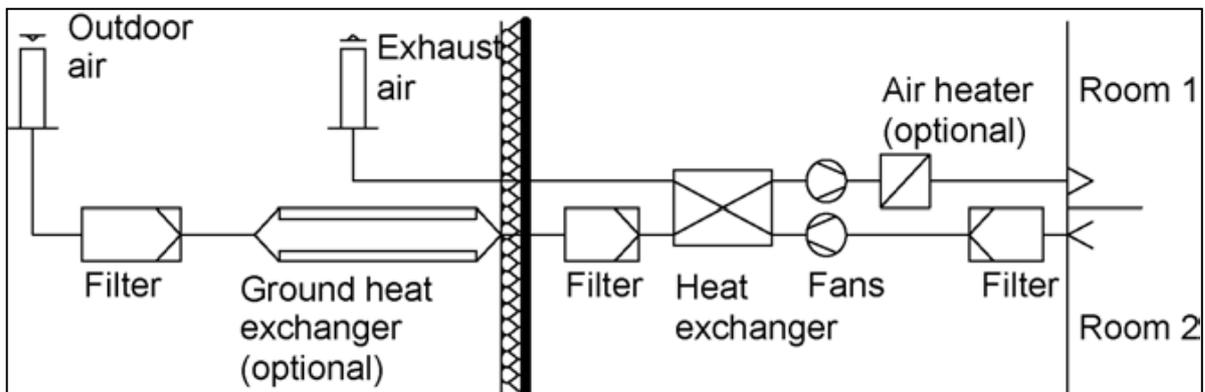


Ilustración 2-5: Sistema de ventilación con calefactor de aire para una vivienda unifamiliar (Feist et al., 2005).

Tabla 2-2: Condiciones borde para el cálculo del comportamiento energético (elaboración propia).

Ubicación	Múnich, Alemania
Volumen (exterior)	250m ³ (con medidas exteriores)
Superficie por persona	22m ² por persona
Radier	100mm hormigón, 300mm aislación térmica (U=0,129 W/m ² K)
Muros	90mm madera sólida, 300mm aislación térmica, 4mm fibrocemento (U=0,117 W/m ² K)
Techumbre plana	90mm madera sólida, 300mm aislación térmica, 4mm revestimiento (U=0,118 W/m ² K)
Vidrios	Triple vidriado hermético, LowE, Argón (U=0,6 W/m ² K, g=0,519)
Sombra	<ul style="list-style-type: none"> • Por ensuciamiento del vidrio y la sombra de plantas o árboles se reduce el factor solar por 0,75*0,95=0,713 (Feist, et al., 2007) • Alero de 1,5m en la fachada con orientación al ecuador • Los vidrios con orientación al este y oeste cuentan con persianas interiores las cuales funcionan automáticamente en la época de verano
Marco de ventanas	Para simplificar el modelo se calcula sin marco
Aire exterior	136 m ³ /hora (30m ³ /(persona y hora))
Infiltración	0,05 1/h (0,6 1/h a 50 pascal)
Ventilación natural adicional en verano	Con temperaturas sobre 23°C un intercambio de aire adicional de 2ACH según (Kehl, 2010)
Eficiencia recuperación de calor	81%
Bypass del intercambiador de calor	En la época de verano hay un bypass
Intercambiador de calor sub-suelo-aire	Largo: 30m, profundidad: 1.5m, diámetro 150mm, material: PVC
Ganancias internas	2,9 W/m ² según capítulo 1
Temperatura interior	Mínima: 20°C, máxima: 26°C
Calefacción	A través del sistema de ventilación con una resistencia eléctrica con el flujo del aire exterior sin recirculación
Refrigeración	A través del sistema de ventilación con el flujo del aire exterior sin recirculación con un equipo "Split"
Temperatura del aire del sistema de climatización	Máxima: 52°C, Mínima: 5°C
Temperaturas del suelo bajo del radier	Se utilizan las temperaturas mensuales calculadas por el PHPP

En los dos programas, es decir, en el PHPP y en el EnergyPlus se realizan los cálculos con la integración de un intercambiador de calor subsuelo y con un intercambiador de calor aire-aire con una eficiencia de un 81%.

Para bajar la complejidad del modelo, y así, reducir el tiempo de la ejecución del estudio paramétrico, se utiliza en el cálculo de E+ el modulo de “ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem” el cual es un sistema de calefacción ideal. Para modelar el intercambiador de calor aire-aire del sistema de ventilación, se reduce el intercambio de aire exterior en invierno por la eficiencia del intercambiador. En verano, se asume que el sistema de ventilación, cuenta con un bypass del intercambiador de calor.

Se realizó el cálculo comparativo entre los programas PHPP y EnergyPlus para el modelo con sus propiedades descritas anteriormente y con el archivo climatológico de Múnich. Para comparar la demanda energética en calefacción y refrigeración se dividió la demanda por la superficie útil neto (100 m²). En la ilustración 2-6, se muestra el resultado de la comparación de la demanda energética en refrigeración y calefacción entre EnergyPlus y PHPP.

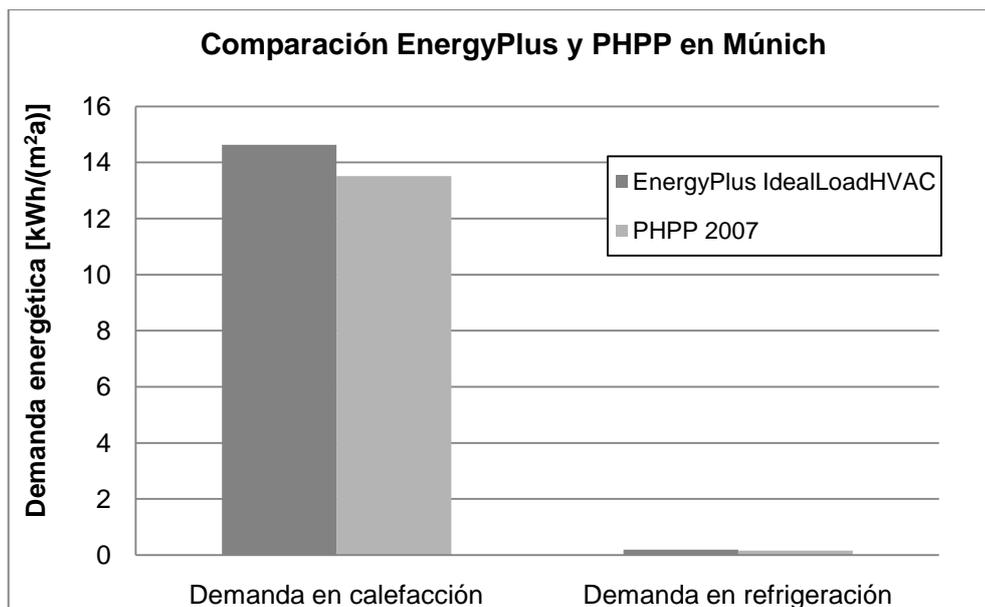


Ilustración 2-6: Comparación de la demanda energética entre los resultados de EnergyPlus “Ideal Load Air HVAC System” y PHPP para el caso de validación en Múnich (elaboración propia).

Se puede observar, que los resultados calculados, por los dos métodos, son bastante similares. La diferencia en la demanda de calefacción es de 1,1 kWh/m²a y la demanda energética en refrigeración es de 0,0 kWh/m²a. La diferencia de 1,1 kWh/m²a significa que en comparación a la demanda energética de una casa tradicional de aproximadamente 100 kWh/m²a es de aprox. del 1%, lo cual, está dentro del rango de la exactitud de los diferentes métodos de cálculo.

Los resultados de la comparación, muestran que los dos métodos y los dos modelos ingresados tienen un comportamiento similar. Dado que, el método PHPP, es validado para el cálculo de casas Passivhaus para el clima de Múnich y los resultados de E+ son similares, se asume, en el marco de este trabajo, que el modelo y método utilizado en los cálculos de E+, igualmente, tienen validez.

2.3.4 Comparación de los resultados calculados con PHPP y EnergyPlus para un caso ubicado en tres climas diferentes de Chile

El método de cálculo PHPP es, como descrito anteriormente, validado para Europa central. Para su aplicación en climas de América del sur, no existe una validación científica, que indique la exactitud de los resultados calculados con el método.

En el marco del presente trabajo se analiza la validez de los resultados del cálculo con el PHPP en tres climas diferentes del centro sur de Chile. Dado que, hasta el día de la redacción del texto, no existieron datos reales medidos, sobre el consumo energético de una casa Passivhaus en Chile, por consiguiente, se decidió analizar la validez de los datos del PHPP, por medio de una comparación, utilizando un software de simulación térmica. El modelo de la casa utilizada para la comparación, es el mismo del punto anterior, en el cual, se verificó la validez de los dos métodos, en el clima de Múnich. La fachada principal del modelo sigue con su orientación hacia el ecuador, lo que significa, que la fachada principal, tiene la orientación hacia el norte, en el hemisferio sur. Dado que, el clima de las tres ciudades estudiadas es menos severo que el clima de Múnich, por lo tanto, se reduce la exigencia de la transmitancia térmica de la envolvente y se cambia el tipo de las ventanas utilizadas. La construcción es la misma que se describe en la tabla 2-2, con la única diferencia de que se implementaron diferentes espesores de la aislación térmica y en lugar de ventanas con un triple vidriado hermético, se utilizan un doble vidriado hermético con low-E y relleno con gas noble.

Para realizar los cálculos con el PHPP en el hemisferio sur hay que adaptar el proceso según (Feist, et al., 2007). Se adaptan los datos climatológicos obtenidos del software Meteonorm y se adapta la orientación de la casa.

En la tabla 2-3, se muestra la temperatura promedio anual, la longitud, latitud, los valores de la transmitancia térmica y el tipo de vidrio utilizado en el análisis de la comparación. Además, se observa que la temperatura promedio anual en Múnich, es más baja que la temperatura de todas las ciudades chilenas analizadas, lo cual se refleja en la necesidad de tener una aislación térmica mejorada en Alemania.

Tabla 2-3: Valores U de la envolvente y tipo de vidrio según ubicación climática utilizados en la comparación de PHPP y EnergyPlus (elaboración propia).

	Múnich	Puerto Montt	Concepción	Santiago
Temperatura promedio anual	7,5°C	10,4°C	12,9°C	14,7°C
Latitud	48,36°	-41,42°	-36,76°	-33,38°
Longitud	11,80°	-73,08°	-73,05°	-70,78°
Radier/losa	U=0,13 W/m²K	U=0,34 W/m²K	U=0,64 W/m²K	U=0,64 W/m²K
Muros	U=0,12 W/m²K	U=0,21 W/m²K	U=0,34 W/m²K	U=0,44 W/m²K
Techumbre plana	U=0,12 W/m²K	U=0,21 W/m²K	U=0,33 W/m²K	U=0,43 W/m²K
Tipo de vidrio	U=0,6 W/m²K g=0,52	U=1,3 W/m²K g=0,74	U=1,3 W/m²K g=0,74	U=1,3 W/m²K g=0,74

Los resultados del análisis, con los dos métodos distintos, en la misma casa, en tres climas diferentes en el centro sur de Chile y uno en Alemania como referencia, se muestran en la ilustración 2-7 y en la ilustración 2-8. En el primer gráfico, se puede observar la comparación entre los resultados del programa PHPP y del programa EnergyPlus, para la demanda energética, en calefacción y en el segundo gráfico, para la demanda energética en refrigeración en forma individual para las ciudades de Múnich, Puerto Montt, Concepción y Santiago.

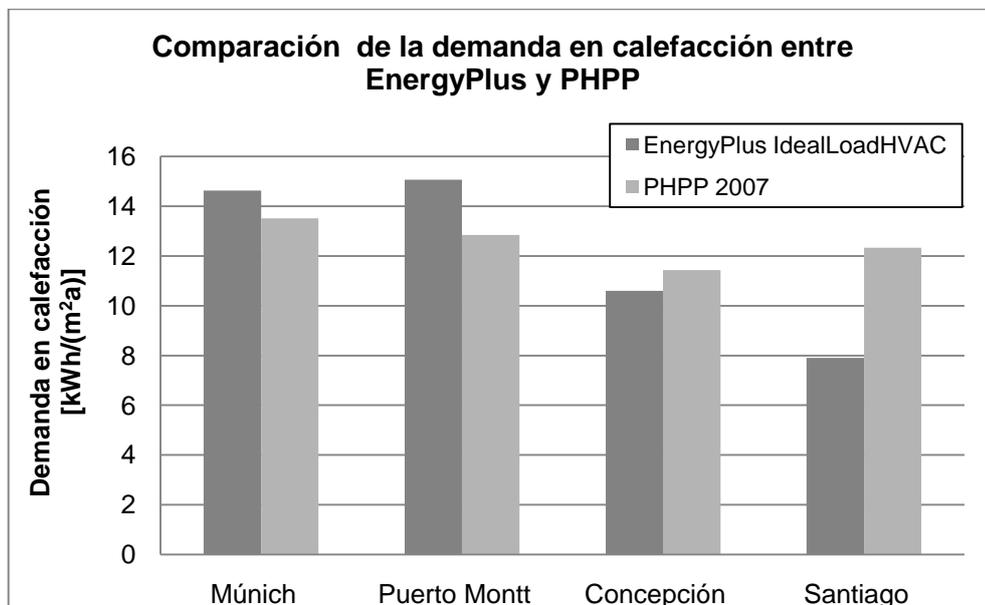


Ilustración 2-7: Comparación de la demanda energética en calefacción entre los resultados de EnergyPlus “Ideal Load Air HVAC System” y PHPP para el caso de validación en Múnich, Puerto Montt, Concepción y Santiago (elaboración propia).

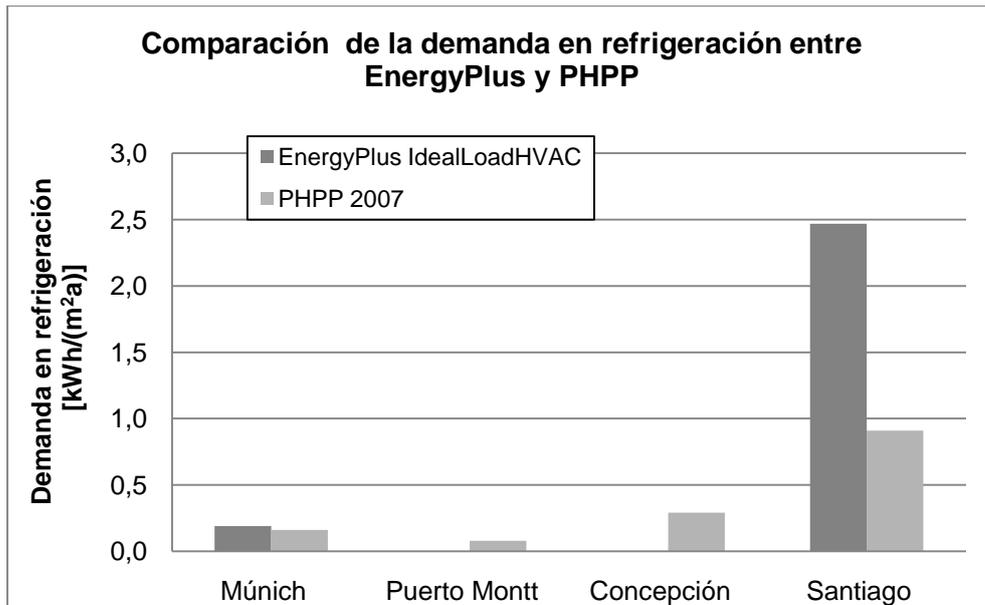


Ilustración 2-8: Comparación de la demanda energética en refrigeración entre los resultados de Energy-Plus “Ideal Load Air HVAC System” y PHPP para el caso de validación en Múnich, Puerto Montt, Concepción y Santiago (elaboración propia).

Los resultados del análisis no permiten una comparación directa de la demanda energética entre las distintas ciudades, dado que, se utilizaron niveles diferentes entre la calidad térmica y la envolvente. Sin embargo, los resultados permiten comparar, para cada ciudad, la diferencia en la demanda energética calculada con los dos métodos distintos.

Con una comparación de los datos se puede observar, que la concordancia de la demanda energética en calefacción y refrigeración entre los dos métodos muestra una variación según la ubicación climática.

En los climas fríos de Múnich y Puerto Montt, EnergyPlus, entrega una demanda energética en calefacción levemente más alta que el PHPP. En los climas más templados, de Concepción y Santiago, cambia la relación y el PHPP entrega una demanda energética en calefacción más alta. En el clima de Santiago, el PHPP entrega una demanda en calefacción considerablemente más alta que el EnergyPlus. Esta diferencia se encuentra fuera del rango de la exactitud aceptable.

Por otra parte, el análisis de la demanda energética, en refrigeración, arroja, según los dos métodos para las ciudades de Múnich, Puerto Montt y Concepción, un comportamiento similar y, además, determina una demanda casi nula. Para la ciudad de Santiago el programa EnergyPlus determina una demanda energética en refrigeración en más del doble del programa PHPP. Esta diferencia igualmente se encuentra fuera del rango de la exactitud aceptable.

2.3.5 Determinación del método para la realización del estudio paramétrico

En el punto anterior se demostró, que los resultados de los dos métodos varían y presentan, sobre todo en el clima de Santiago, una discrepancia. Una de las causas de la diferencia entre los resultados puede ser, que el método simplificado PHPP, usa los mismos factores del uso de las ganancias en climas fríos, al igual que en climas templados o calurosos. Múltiples autores como (Kalema, et al., 2008; Kokogiannakis, et al., 2008; Rochard, 2008; Staudt et al., 2010; Vincenzo et al., 2007) entre otros, se refieren a este tema y aconsejan de adaptar los factores de la utilización de las ganancias de la (DIN EN ISO 13790:, 2008) a los climas distintos. La misma norma contiene algoritmos para adaptar los factores a nivel nacional. Según conocimientos del autor, para Chile, no existen factores en la utilización de las ganancias adaptadas.

Otra causa posible para las diferencias en los resultados puede estar en los datos meteorológicos utilizados. Los datos mensuales de la norma (NCh1079 of, 2008) fueron procesados con el software Meteonorm (Meteotest, 2010) y exportados para el software EnergyPlus como valores por hora y para el software PHPP como valores mensuales, adaptados especialmente para este software. Según (Feist, et al., 2007) no se debe utilizar estos datos procesados para cualquier análisis sin tener presente su posible deficiencia. Hasta hoy día, la elaboración de datos climatológicos para el análisis de la potencia en calefacción y refrigeración, según Feist, sólo se puede realizar a través de una simulación térmica.

Una tercera posibilidad puede ser que los resultados de las simulaciones térmicas con el programa EnergyPlus son erróneos. Se evalúa esta posibilidad como mínima, dado que los resultados presentaron una buena concordancia en el clima de Múnich. Para las ciudades chilenas no se cambió el modelo, por lo tanto no debería presentar errores.

En conclusión se puede inferir, que los resultados calculados con el PHPP en los datos meteorológicos de Meteonorm, no muestran un comportamiento satisfactorio en comparación a los resultados de las simulaciones dinámicas. Por lo tanto, existe la posibilidad de que los datos meteorológicos o el mismo programa PHPP, tienen que ser adaptados para el centro sur de Chile. Además, existe la posibilidad de que los dos problemas ocurran simultáneamente y de que aumente la discrepancia, dado que los resultados en Puerto Montt y en Concepción con sus climas más fríos muestran un comportamiento aceptable. Si se pretende utilizar el PHPP como herramienta validada en Chile, hay que ejecutar un estudio de verificación o adaptación.

Para el presente estudio se utiliza el método de la simulación térmica con el programa EnergyPlus, cual ha sido previamente validado, según los requisitos del estudio por argumentación anterior.

2.4 Automatización de las simulaciones para el estudio paramétrico

2.4.1 Automatización de simulaciones térmicas en general

Como se ha planteado anteriormente, se realiza el estudio con el método de simulaciones paramétricas multifactoriales. Para realizar este tipo de estudio, existen diferentes posibilidades, donde, la posibilidad más básica es un estudio paramétrico simple, en el cual se cambia el nivel de un parámetro manualmente, se ejecuta una simulación y se obtiene un resultado. Este proceso se repite según el número de los niveles del parámetro a estudiar y luego se comparan los resultados. Si el número de los parámetros y niveles aumenta y, es cada vez más intenso en tiempo de trabajo, se pueden cambiar las posibilidades manualmente.

Para facilitar el proceso de un estudio paramétrico se implementaron algunos programas algoritmos para automatizar las simulaciones paramétricas. El software Designbuilder o el software EnergyPlus entre otros tienen incorporado un preprocesador para estudios paramétricos simples. En estas aplicaciones se define el parámetro y sus niveles a cambiar y el programa realiza el cambio de los niveles y parámetros automáticamente. En el software EnergyPlus esta aplicación para los estudios paramétricos es limitada a 100 simulaciones.

Si el problema a investigar es más complejo o contiene muchos parámetros y niveles, es conveniente aplicar otra metodología para automatizar las simulaciones. Para realizar estudios paramétricos multifactoriales se separan generalmente los procesos. En la primera etapa se definen los parámetros y niveles a variar, en la segunda etapa se crean automáticamente los archivos de input para las simulaciones, en la tercera etapa se realizan las simulaciones, en una cuarta etapa se guardan los resultados de las múltiples simulaciones en un solo archivo. Para esta automatización se puede programar un software propio o utilizar un software ya existente. Algunos de estos software existentes para estudios paramétricos multifactoriales son: GenOpt, JEplus, BEopt o OptEPlus.

Los estudios paramétricos multifactoriales en muchas aplicaciones implican un número enorme de simulaciones. Si se busca, en un estudio el óptimo o mínimo de una variable de respuesta, como por ejemplo, la demanda energética o los costos del ciclo de vida, se puede reducir la cantidad de las simulaciones y así, el tiempo de la ejecución con algoritmos numéricos de la optimización como descrito por ejemplo en (Ellis, et al., 2006; Peeters et al., 2010; Tuhus-Dubrow and Krarti, 2010; Wetter and Wright, 2003; Wright and Alajmi, 2005; Zhang, 2009; Zhang and Korolija, 2010). Dado que las características computacionales aumentan cada día, en ocasiones, no es necesario reducir la cantidad de las simulaciones e implicar el método de la optimización automatizado.

2.4.2 Descripción del software de automatización utilizado en el estudio

Para la ejecución de las simulaciones multifactoriales se eligió el programa GenOpt. Este programa es en primera línea, un programa de optimización, pero cuenta igualmente con una opción para realizar estudios paramétricos.

GenOpt es un programa de optimización para la minimización de una variable de respuesta que es evaluada por un programa de simulación externo (Wetter, 2009). Se ha desarrollado el programa para problemas de optimización, donde la función de costo es computacionalmente costosa y sus derivados no están disponibles o ni siquiera existen. GenOpt puede ser conectado a cualquier programa de simulación que lee los datos de ingreso de archivos de texto y escribe sus resultados igualmente a un archivo de texto. Las variables independientes pueden ser variables continuas (posiblemente con límites inferior y superior), variables discretas o las dos, variables continuas y discretas. GenOpt puede correr simulaciones en paralelo para aumentar la velocidad de la evaluación.

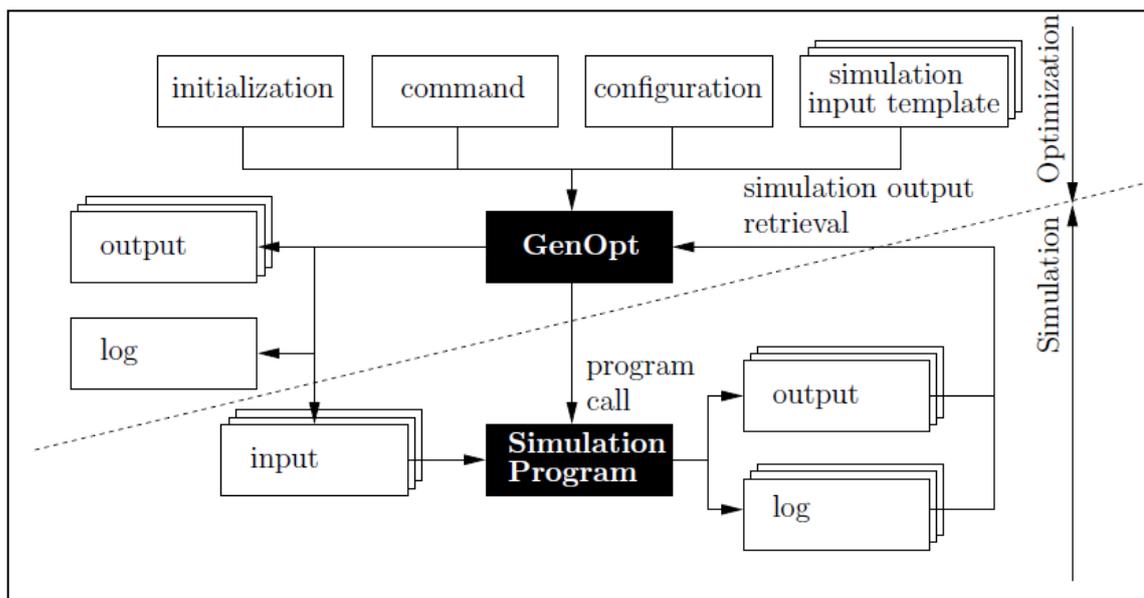


Ilustración 2-9: Esquema del proceso de la automatización de las simulaciones entre el programa de simulación térmica y GenOpt (Wetter, 2009).

En la ilustración 2-9, se grafica el esquema del proceso de la automatización entre GenOpt y el programa de simulación térmica en este caso con el EnergyPlus. GenOpt genera, a través de los archivos de comando y configuración, los archivos de input para la simulación térmica. Después, GenOpt manda los archivos de input al programa de simulación, ordena el comienzo de la simulación, analiza el archivo de los resultados de las simulaciones y crea un archivo de resumen de los resultados de todas las simulaciones ejecutadas.

2.4.3 Definición del proceso del estudio paramétrico multifactorial

Como se describe anteriormente, se evalúa el comportamiento térmico de los casos de estudio, a través de simulaciones térmicas y, se analiza después, su rentabilidad económica en comparación a un caso de referencia. Se ejecuta un estudio paramétrico multifactorial, para obtener la influencia del cambio de diferentes componentes de la construcción. Se realizan las simulaciones multifactoriales según el proceso graficado en la ilustración 2-10. Este proceso contempla los siguientes puntos claves:

- Definición del caso base y creación de un archivo tipo para las simulaciones.
- Definición de los parámetros a variar y sus niveles de variación.
- Definición de los casos de referencia.
- Ejecución de las simulaciones con el conjunto de los programas GenOpt y Energy-Plus.
- Creación de una base de datos con los resultados de las simulaciones.
- Agregar a la base de datos los resultados de cálculos de la rentabilidad económica para cada caso simulado.
- Analizar y visualizar los resultados obtenidos.

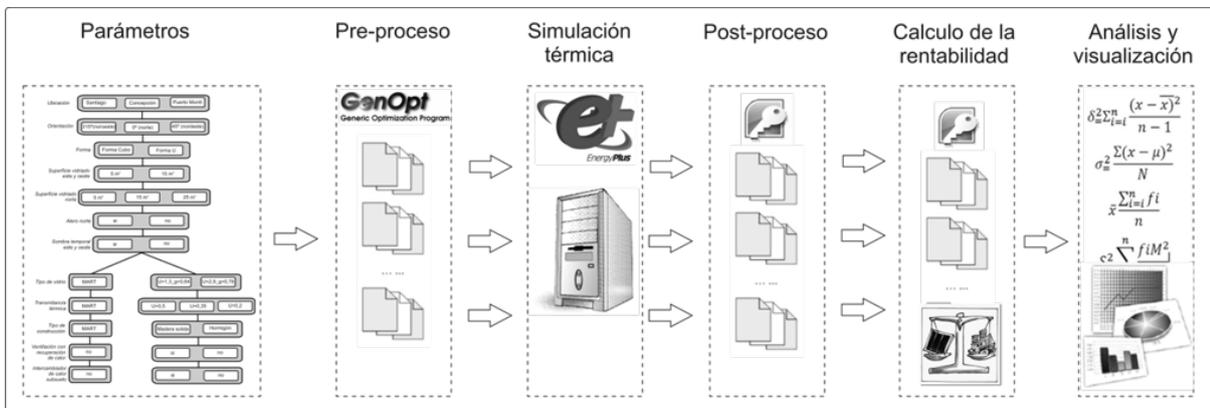


Ilustración 2-10: Flujo del proceso del estudio paramétrico multifactorial (elaboración propia).

Para la ejecución de las simulaciones se utiliza un computador personal con un procesador Intel core i5 con 4 núcleos y una velocidad de 3.1 GHz. Se puede ejecutar en cada núcleo una simulación al mismo tiempo, por lo tanto pueden correr 4 simulaciones en forma paralela, lo que significa una disminución del tiempo de ejecución a un cuarto del tiempo con un procesador con un solo núcleo. La duración total de la ejecución de las aproximadamente 21.000 simulaciones es de aprox. 60 horas o 2,5 días. Con un clúster de múltiples computadores se podrá reducir significativamente el tiempo de la ejecución.

En el marco del proyecto FONDEF (Hempel, et al., 2012) y del presente trabajo, se incorporaron dos alumnas de la carrera de Ingeniería Estadística de la Universidad del Bío-Bío. Srta. Cynthia Aguilera Puentes y Srta. Alicia Ferreira Becerra que desarrollaron, su proyecto del título a través del análisis estadístico de los datos del estudio paramétrico, denominado “Análisis estadístico de los factores que influyen en el consumo de energía de viviendas del tipo Passivhaus”, que fue aprobado exitosamente el día 11 de septiembre del 2012. Ellas aportaron para el presente trabajo el análisis estadístico de los datos del estudio paramétrico, que consiste en el procesamiento de los datos brutos y en la determinación de los valores promedio, desviación estándar, máximos y mínimos de los niveles de los parámetros.

CAPÍTULO
3.

DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA
EL ESTUDIO MULTIFACTORIAL

3 Definición de los parámetros para el estudio multifactorial

3.1 Determinación de los parámetros a variar en el estudio que influyen en el comportamiento energético-térmico

3.1.1 Parámetros que influyen en el comportamiento energético-térmico de una edificación en general

La vivienda y sus elementos constructivos, en su interacción con el medio ambiente, se someten a una serie de fenómenos de captación, almacenamiento y transferencia de calor (Bustamante, et al., 2009). El calor como forma de energía, puede ser cuantificado, en un período determinado. Es posible determinar el calor, que se transfiere a través de la envolvente de la vivienda en la medida que exista una diferencia de temperatura entre el ambiente interior y el exterior. Igualmente, se puede estimar la cantidad de calor, que por unidad de tiempo, es necesaria para lograr el confort térmico, en un determinado recinto. En síntesis, en una vivienda están ocurriendo permanentemente fenómenos de transferencia de calor, los que se resumen en lo siguiente:

- 1.- Transmisión de calor a través de elementos opacos y vidriados de la vivienda.
- 2.- Ganancias o pérdidas de calor por intercambio de aire entre el interior y exterior.
- 3.- Ganancia solar tanto por elementos opacos como vidriados.
- 4.- Ganancias internas.

En la ilustración 3-1, se muestran, los distintos mecanismos de transferencia de calor en un recinto.

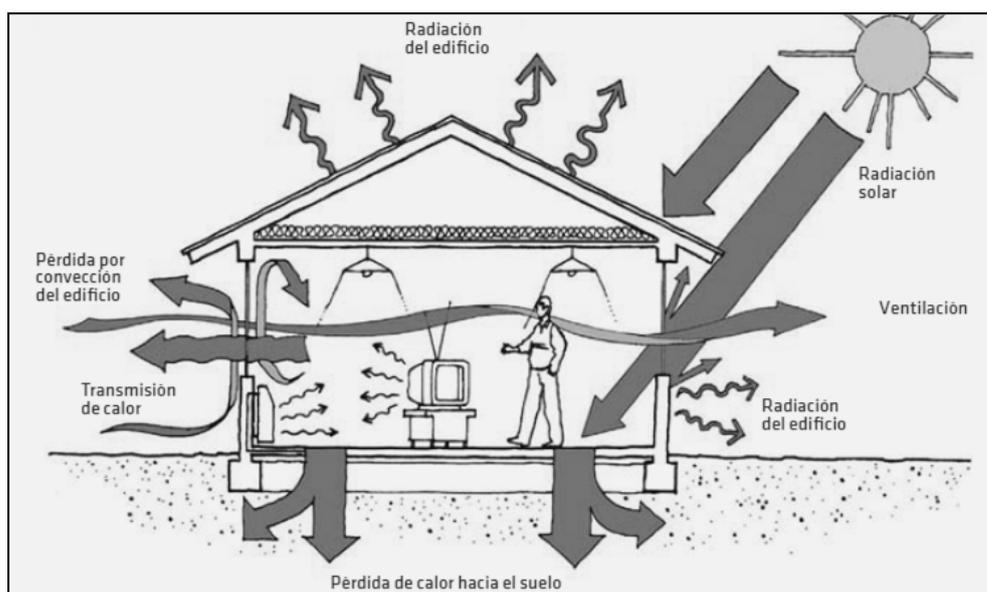


Ilustración 3-1: Mecanismos de transferencia de calor en un recinto (Bustamante, et al., 2009).

Uno de los parámetros principales, que influye en los fenómenos de transferencia de calor, es la ubicación o el clima en el exterior de la edificación. La misma edificación, ubicada en Europa central y en el desierto del Sahara, tendrá un comportamiento energético-térmico completamente distinto. Otro parámetro que influye, es el uso de la edificación, como por ejemplo, un edificio de oficinas muestra un comportamiento distinto, que el de una vivienda o de un restaurante, por sus condiciones de uso.

Otros parámetros, con un carácter más específico, es la orientación de la vivienda con respecto al norte, las superficies transparentes y su composición, tipo y configuración de la envolvente, geometría de la edificación, elementos de protección solar, tasa de ventilación e infiltración de aire, equipos de climatización y ventilación, entre otros.

Con los métodos descritos, en el capítulo 2, se pueden analizar los fenómenos de transferencia de calor de manera numérica, ya sea, con un método simplificado o con una simulación térmica. Se puede evaluar el impacto que produce el cambio, de un parámetro o de un nivel a otro, en la demanda energética de una edificación.

3.1.2 Parámetros definidos, para analizar su influencia en el comportamiento energético-térmico de los casos de estudio

Una casa construida según el estándar Passivhaus en Europa central, cuenta generalmente con algunos parámetros claves. El concepto general es: reducir las pérdidas de calor al mínimo posible, maximizar las ganancias solares en invierno y minimizar las ganancias solares en verano. Por consiguiente, para lograr este concepto, existen para Europa central según (Passivhausinstitut, 2009), las siguientes recomendaciones:

- Envoltente altamente aislada, sin puentes térmicos.
- Diseño lo más compacto posible.
- Orientación de las superficies vidriadas hacia el ecuador (lado soleado).
- Vidrios y marcos de las ventanas de una calidad térmica superior.
- Hermeticidad altísima de la edificación.
- Sistema de ventilación con recuperación de calor.

Uno de los objetivos del estudio, es evaluar la posibilidad de implementar el estándar Passivhaus en el centro-sur de Chile. Por consiguiente, para lograr este objetivo, se investiga el comportamiento de los parámetros recomendados, para Europa central, en distintas situaciones climáticas de Chile. En la ilustración 3-2, se muestra un esquema de una casa Passivhaus con sus elementos típicos en Europa central.

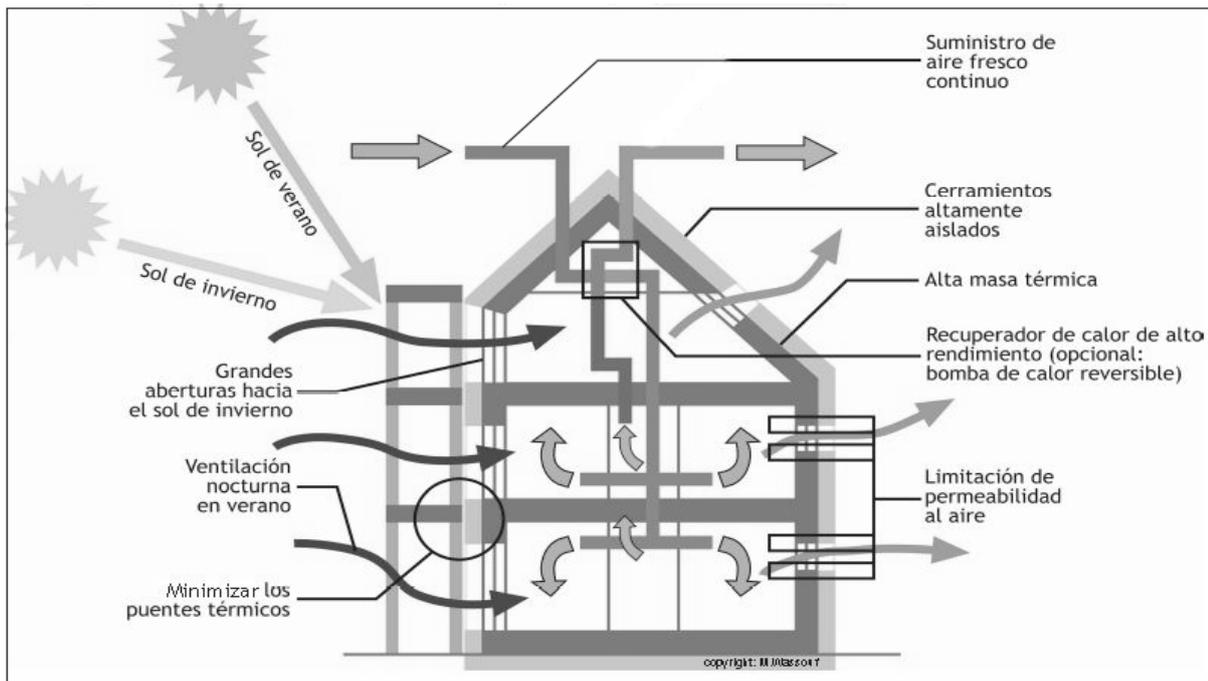


Ilustración 3-2: Esquema de una casa Passivhaus con sus elementos y parámetros típicos (Ruiz de Gauna, 2012).

En general, se puede determinar la influencia de los distintos parámetros en la demanda energética, después de la realización del estudio. La selección de los parámetros variables es, por lo tanto, una propuesta como argumentan igualmente los autores (Eisenhower et al., 2012; Hygh et al., 2012; Liang and Shen, 2012). Los resultados obtenidos de este tipo de estudio, muestran cuales son los parámetros más importantes. Para reducir la complejidad del estudio multifactorial, se reduce la cantidad de los parámetros, a los parámetros que están fuertemente relacionados con el estándar y se dejan algunos parámetros fijos. Algunos de estos son, entre otros, una hermeticidad alta de la envolvente, o una superficie vidriada reducida hacia el sur, dado que este no presenta ganancias solares. La hermeticidad de la edificación es un parámetro importante, como se describe en el capítulo 1.4.2. La hermeticidad no solo influye en la demanda energética, sino también en el confort, cuando se forma corriente de aire y, por otra parte, en la durabilidad de la construcción, cuando se forma condensación intersticial.

Otros parámetros están altamente relacionados con el estándar y con las recomendaciones para Europa central, tales como: una envolvente altamente aislada, o la necesidad de incorporar un sistema de ventilación con recuperación de calor. Con los resultados del estudio, se pretende aclarar, si las recomendaciones vigentes, en Europa central, son igualmente vigentes para el centro-sur de Chile. Si el resultado es negativo, es necesario modificar las recomendaciones, para la implementación del estándar en Chile. En una segunda etapa, se evalúa la rentabilidad económica de cada parámetro estudiado. Un ejemplo puede ser, que un sistema de ventilación con recuperación de calor, bajará posiblemente la demanda

energética, de una vivienda en un clima templado, pero no, lo suficiente para justificar la inversión inicial más elevada. En la tabla 3-1, se muestra un resumen de los parámetros elegidos, los cuales se varían en el marco del estudio multifactorial.

Tabla 3-1: Parámetros elegidos para analizar su impacto en el marco del estudio multifactorial (elaboración propia).

1. Ubicación/clima
2. Orientación con respecto al norte
3. Factor forma o compacidad
4. Superficie vidriada este y oeste
5. Superficie vidriada al norte
6. Alero norte o protección solar al norte
7. Protección solar para las superficies vidriadas al este y oeste
8. Tipo y configuración del vidrio
9. Transmitancia térmica de la envolvente
10. Inercia o masa térmica (material/tipo de la construcción)
11. Recuperación del calor del aire
12. Intercambiador de calor subsuelo-aire (geotermia)

El modelo de los casos de estudio, se muestra en el capítulo 2. Las configuraciones utilizadas son las mismas que las de los modelos de evaluación, con algunas excepciones que se describirán más adelante. El modelo representa una casa de 100m² de superficie construida y un volumen (medidas exteriores) de 250m³. La descripción de la forma y la geometría se describen más adelante, en el presente capítulo. Se fijan los valores de las ganancias internas, el intercambio de aire, las infiltraciones y las temperaturas interiores deseadas para todos los casos de estudio, como ya se ha descrito anteriormente en los capítulos 1 y 2, no se varía la superficie vidriada hacia el sur, para reducir la cantidad de las simulaciones y se establece un valor del 10% del muro. Este valor refleja una superficie vidriada relativamente pequeña, dado que, las ventanas hacia el sur presentan generalmente un balance energético negativo, por falta de ganancias solares. Para garantizar una cierta iluminación natural, tampoco es recomendable, eliminar las ventanas sur por completo.

Se analiza la casa como una sola zona térmica, lo cual entrega resultados en el rango de la exactitud requerida, sobre la demanda energética global de la casa. Las diferencias en los resultados de la demanda energética de una casa Passivhaus modelada con una o varias zonas térmicas, son mínimas, dado que, por la calidad de la envolvente y por el sistema de ventilación, no existe una gran diferencia de temperatura entre los distintos recintos de una casa pasiva (Feist, et al., 2007).

3.1.3 Exigencias generales en la calidad térmica de la envolvente para garantizar confort térmico y para evitar riesgos para la salud por crecimiento de moho

Los elementos en contacto con el exterior, o bien, la envolvente de una edificación, protegen las personas y los bienes en el interior de los diferentes impactos del exterior. Estos impactos son entre otros: ruido, lluvia, viento, temperaturas bajas y altas, radiación solar y contaminación. Para que la envolvente pueda proteger el interior de los distintos impactos, tiene que cumplir con diferentes aspectos. En el presente subcapítulo se evalúan las propiedades térmicas mínimas, con las cuales deben cumplir los componentes de la envolvente, aparte de aumentar la eficiencia energética de una edificación. Se analizan dos criterios, primero el criterio de confort y segundo el criterio de higiene.

1. Determinación del valor U máximo para cumplir con el criterio de confort a través de la temperatura superficial interior mínima de la envolvente:

El confort térmico no depende sólo de la temperatura del aire, sino que, de una mezcla de las temperaturas del aire y de las superficies del entorno, dado que, las superficies del entorno producen una radiación de calor, la cual, influye en el confort térmico. La temperatura superficial interior de elementos de la envolvente, no debe ser más baja, que la temperatura ambiental interior menos 4,2 °C, para garantizar un confort térmico. Si la diferencia es más elevada, se produce un movimiento de la capa de aire fría, generalmente, la capa cerca de la envolvente (ventanas), que baja al piso por diferencias de temperatura y forma una capa de aire frío en el suelo. Esta temperatura fría en el suelo provoca un disconfort térmico en el habitante, dado que, una persona no se siente cómoda, si la diferencia de la temperatura entre los pies y la cabeza, es más de 3°C (Krick, et al., 2011).

Con el criterio de confort, al no permitir una diferencia entre las temperaturas ambientales interiores y la superficie interior de más de 4,2 kelvin, se puede calcular el valor U máximo permitido a través de una ecuación (3.1).

$$U \leq \frac{4,2[K]}{R_{si}[m^2K/W] \cdot (\Theta_{op}[K] - \Theta_a[K])} \quad (3.1)$$

El factor de la resistencia térmica superficial interior R_{si} , se aplica según (NCh1973 of, 2008) para elementos horizontales. Para el caso de ventanas es $R_{si} = 0,13 (m^2K)/W$. La temperatura ambiental interior Θ_{op} se fija según el estándar Passivhaus en 20°C para invierno y la temperatura exterior mínima Θ_a se obtiene del software Meteonorm V6.1. En la ilustración 3-3, se muestran los valores U máximos permitidos para cumplir el criterio de confort.

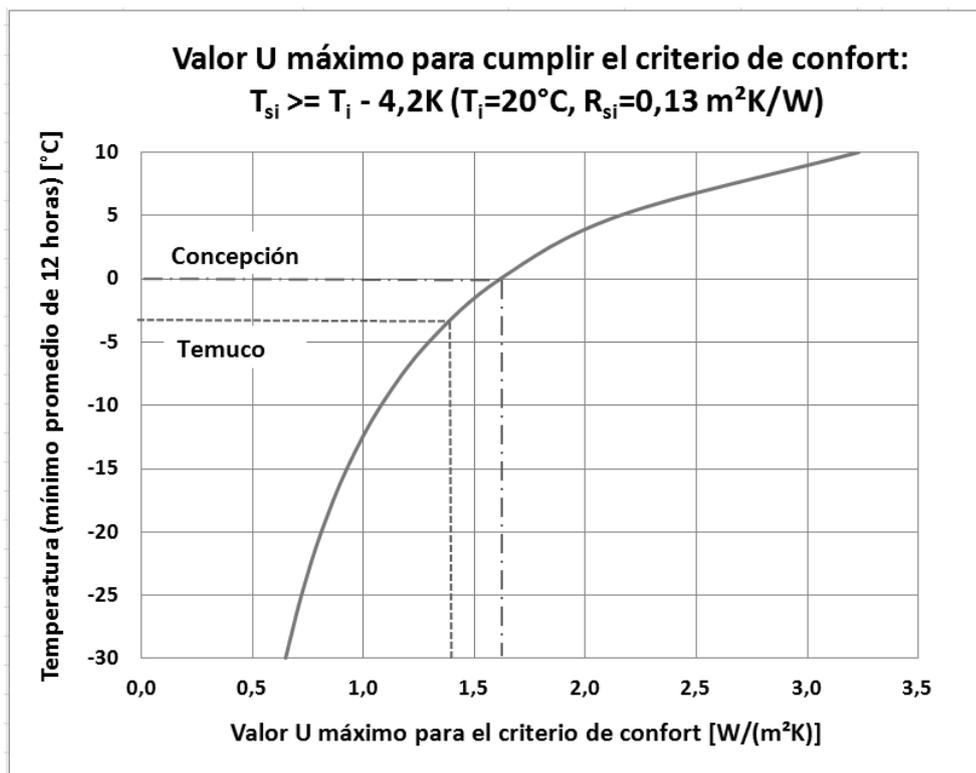


Ilustración 3-3: Valor U máximo permitido para cumplir el criterio de confort en relación con la temperatura ambiental interior y la temperatura exterior (elaboración propia).

Se puede observar, que los valores U máximos permitidos, para cumplir el criterio de confort en el centro sur de Chile, son alrededor de $1,5 W/(m^2K)$. El cumplimiento de estos valores, en general, no muestran dificultades con la envolvente opaca, dado que, no son muy exigentes. Sin embargo, por otra parte, cumplir el criterio de confort con las superficies vidriadas, presenta mayores dificultades, dado que, ni ventanas con vidrios simples, ni con termopaneles comunes, cumplen con los valores máximos permitidos.

II. Determinación del valor U máximo para cumplir con el criterio de higiene (evitar crecimiento de moho):

El criterio de higiene significa, que la temperatura superficial interior de un componente o elemento de la edificación, no debe caer por debajo de un límite, para hacer improbable el desarrollo de moho, teniendo en cuenta la temperatura y la humedad relativa interna. Igualmente se debe evitar el riesgo de otros problemas por condensación superficial. Para evitar la formación y crecimiento de mohos, es conveniente según (NCh1973 of, 2008), que la humedad relativa en las superficies no supere un 80% durante varios días. Las temperaturas y humedades relativas para calcular los valores U máximos, se obtienen de la norma chilena (NCh1079 of, 2008) y se aplica el método de cálculo de la norma (NCh1973 of, 2008). Los valores señalados en tabla 3-2, están calculados para elementos verticales de la envolvente, como muros y ventanas.

Tabla 3-2: Valores U máximos para evitar crecimiento de moho (elaboración propia).

Ciudad	Temperatura exterior media mínima	Humedad relativa exterior	Temperatura interior (T° de confort)	Humedad relativa interior	U _{max} para evitar crecimiento de moho (80%)	U _{max} para evitar condensación superficial (100%)
	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[W/(m²K)]	[W/(m²K)]
Santiago	3,9	84	20	61	2,02	3,67
Concepción	5,6	88	20	67	1,57	3,42
Temuco	3,9	89	20	63	1,80	3,45
Puerto Montt	3,9	90	20	64	1,76	3,41

Se observa, que se puede evitar una condensación superficial en todas las ciudades, con valores U no muy exigentes. Para evitar una condensación superficial en las ventanas, hay que emplear termopaneles, dado que, un vidrio simple no logra el valor U máximo permitido. En la ilustración 3-4, se muestra la relación entre la humedad relativa interior, la temperatura superficial interior de la envolvente y el riesgo de crecimiento de moho o de condensación superficial. En el área superior de la línea continua (80%), existen condiciones favorables para el crecimiento de moho y en el área superior de la línea punteada (100%), existen condiciones favorables para la condensación superficial.

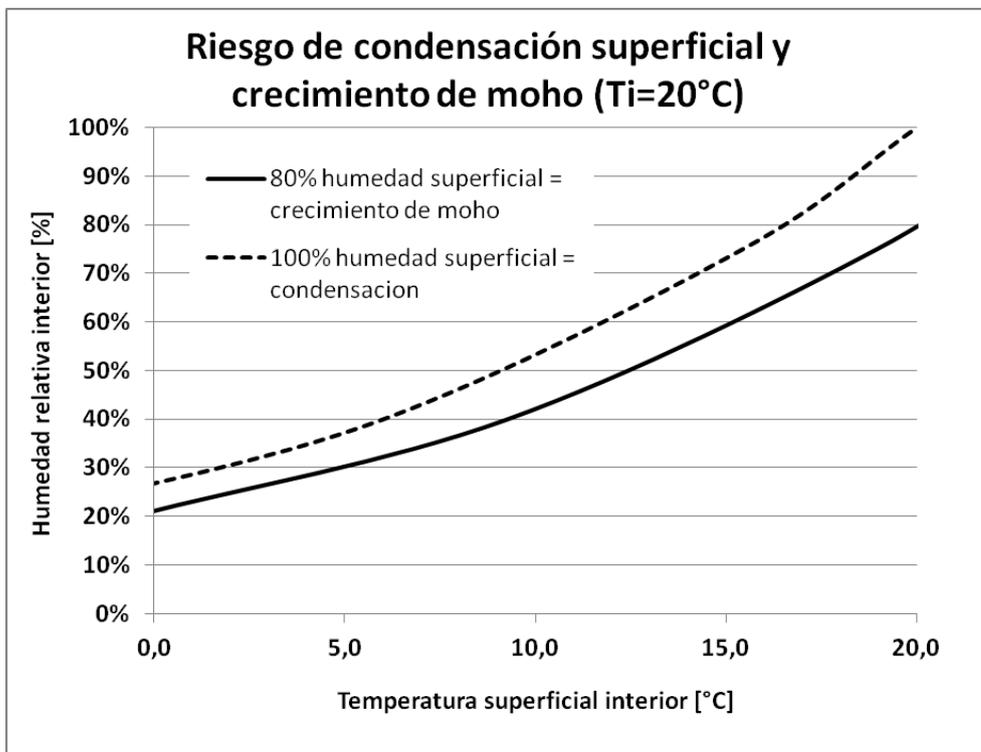


Ilustración 3-4: Riesgo de condensación superficial y crecimiento de moho según (NCh1973 of, 2008) (elaboración propia).

En general, todas las partes de la envolvente deben cumplir con los dos criterios, el criterio de confort y el criterio de higiene. En la tabla 3-3, se muestra el resumen de los valores U máximos permitidos de los dos criterios y el valor U máximo permitido para cumplir con los dos criterios. Se puede observar, que en las ciudades de Santiago, Temuco y Puerto Montt, es el criterio de confort el más crítico, mientras que, en Concepción es el criterio de higiene, dado que, la humedad absoluta en invierno es bastante alta.

Tabla 3-3: Determinación de los valores U máximo para cumplir el criterio de confort y el criterio de higiene en 4 ciudades diferentes para elementos verticales como ventanas (elaboración propia).

Ciudad	U _{max} para el criterio de higiene	U _{max} para el criterio de confort	U _{max} para cumplir los dos criterios
	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
Santiago	2,02	1,48	1,48
Concepción	1,57	1,61	1,57
Temuco	1,80	1,38	1,38
Puerto Montt	1,76	1,44	1,44

Las partes de la envolvente deben cumplir con los dos criterios simultáneamente, para no presentar problemas por los efectos descritos. Para elementos horizontales, como las techumbres, se debe analizar las propiedades mínimas con otras condiciones límites.

Los elementos opacos, en general, no deben presentar problemas para cumplir con los criterios, dado que, la aplicación de una aislación térmica mínima, ya permite lograr los valores U permitidos. Sin embargo, se puede observar en muchas construcciones existentes, un problema grave de crecimiento de moho. Estos problemas tienen en general dos razones, la primera es una temperatura superficial baja, a causa de una construcción deficiente por falta de aislación térmica y por una calefacción insuficiente de los recintos, la segunda es una alta humedad relativa interior, por falta de ventilación y por una producción de humedad elevada al interior de las viviendas. Con el estándar Passivhaus se abordan los problemas, a través de una envolvente térmica de alta calidad, una ventilación forzada y con una calefacción continua.

Por otra parte, los elementos transparentes presentan, en especial las ventanas, incluyendo sus marcos, problemas de condensación superficial y demasiado crecimiento de moho, por no cumplir con los valores U máximos. Por consiguiente, para cumplir con los dos criterios, sin excepción, hay que instalar en las ciudades estudiadas, termopaneles mejorados, con una capa de baja emisividad y relleno con un gas noble, como el argón. Una especificación más detallada de los tipos de vidrio, se incluye en el punto de la definición del parámetro "tipo de vidrio".

3.2 Determinación de los niveles de los parámetros a variar para los casos de estudio

3.2.1 Clima / Ubicación

En el capítulo 1, se mencionó la diversidad climática de Chile, ya que existe una alta diferencia entre el norte del país y el sur, al igual que, entre la costa en el oeste y las montañas en el este. Para establecer las regiones a estudiar, se fijó hacia el norte, el límite en la zona térmica 3, representado por Santiago, este límite se eligió por dos razones, la primera razón es porque el estándar Passivhaus tiene sus raíces y fue originalmente desarrollado para climas fríos, por lo tanto, se estudiará su comportamiento en las zonas climáticas que presentan posiblemente una necesidad en refrigeración, la segunda razón, es el hecho de que un gran porcentaje, de la población de Chile, está concentrada en la región metropolitana, por lo tanto, un aumento de la eficiencia energética de esta región significa un impacto importante a la demanda energética del país.

Como límite hacia el sur, se eligió la zona térmica 6, representado por Puerto Montt, dado que el clima de la zona térmica 6, todavía muestra condiciones climáticas menos severas que los países del origen del estándar. Por estas diferentes condiciones, no se conoce la configuración que debe tener una casa para cumplir el estándar Passivhaus en esta zona térmica. El clima de Chile, más al sur, es bastante parecido al clima de Europa central, por lo tanto, se presume que las casas deben tener una configuración parecida a las de Europa central, para lograr el estándar. Otro argumento para establecer el límite en el sur, es el subsidio de la energía en las zonas del sur extremo. Desde el punto de vista económico, no es rentable construir casas altamente eficientes, mientras continúa este subsidio. Desde el punto de vista de la sustentabilidad, claramente, será altamente deseable construir casas eficientes.

Se eligió la ciudad de Concepción por representar la zona térmica 4. Concepción está ubicada entre Santiago y Puerto Montt y concentra, igualmente como señalado para Santiago, un porcentaje importante de la población del país, por lo tanto, también será significativo, el impacto del ahorro para través de casas más eficientes.

En la tabla 3-4, se muestran las tres ciudades, Santiago, Concepción y Puerto Montt, las cuales representan, en el estudio, las tres diferentes zonas térmicas investigadas, según la reglamentación térmica (MINVU, 2006) y las distintas zonas climáticas según la norma (NCh1079 of, 2008).

Tabla 3-4: Niveles del parámetro ubicación y la clasificación de las tres ciudades elegidas según reglamentación térmica y NCh. 1079 of 2008 (elaboración propia).

Ubicación	Zona térmica según reglamentación térmica (MINVU, 2006)	Zona climática según (NCh1079 of, 2008)
Santiago	Zona térmica 3	CI Central Interior
Concepción	Zona térmica 4	SL Sur Litoral
Puerto Montt	Zona térmica 6	SL Sur Litoral

3.2.2 Orientación

Con respecto a la orientación de la vivienda, generalmente, se refiere a la orientación de las superficies vidriadas, dado que, ellas captan el sol y aportan ganancias solares.

Con respecto a la orientación de la vivienda, asumiendo el criterio de tener el máximo acceso al sol para periodos fríos del año, la mejor decisión, es hacerlo hacia el norte, ya que, en esa fachada se diseñan ventanas de mayor tamaño que al sur. Esto es válido para todo el país, siendo un poco más flexible hacia el norte de la Zona Norte Litoral y en la región austral, donde siempre el clima es más frío y se capta mayor energía del sol en orientaciones de ventanas al este y oeste (Bustamante, et al., 2009).

Uno de los puntos claves del estándar Passivhaus en Europa central, es la orientación de las superficies vidriadas más grandes, en dirección al ecuador, para maximizar las ganancias solares. Este aspecto, igualmente se considera, en el estudio y se investiga la influencia de una orientación de $\pm 45^\circ$ hacia el norte. No se gira la casa completamente a 360° , dado que, este efecto se aborda con el cambio de los tamaños de las superficies vidriadas al norte, este y oeste.

En el estudio se investiga la influencia, de una orientación, no al cien por ciento hacia el norte. Esta situación ocurre frecuentemente, dado que, el sitio de la construcción, muchas veces no cuenta con una orientación óptima. Por consiguiente, en estas situaciones es casi imposible lograr un diseño con la fachada principal hacia el norte, sin perder mucho terreno y superficie útil.

En la tabla 3-5, se muestran los niveles del parámetro orientación. Se varía la orientación en tres niveles: noroeste, norte y nordeste.

Tabla 3-5: Niveles del parámetro orientación (elaboración propia).

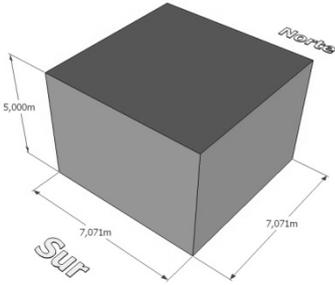
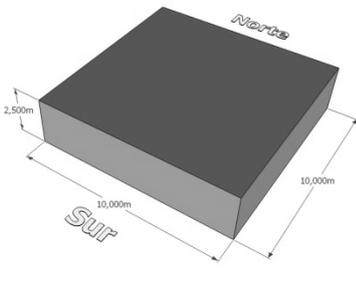
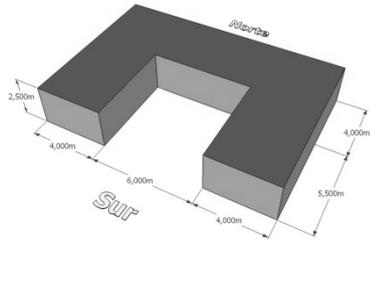
	1	2	3
Orientación	Noroeste (315°)	Norte (0°)	Nordeste (45°)

3.2.3 Geometría / Volumen / Factor de forma (Se/V)

Se puede describir la compacidad de una edificación con el factor de forma según (Bustamante, et al., 2009). "Con el mismo tipo de envolvente, las pérdidas de calor a través de ella disminuyen en la medida que la envolvente expuesta de la vivienda tenga una menor superficie. Para un idéntico volumen de espacio interior de la vivienda podrá tener diferente superficie de envolvente expuesta. Ello porque puede ocurrir que se tenga un perímetro de vivienda irregular u otro tendiente a ser cuadrado (por ejemplo). Este último constituye una vivienda más compacta. La superficie expuesta de una vivienda también disminuye en la medida que se tengan viviendas pareadas, continuas o simplemente la vivienda pertenezca a un edificio de varios pisos. Se define el factor de forma $Cf = Se/V$ como el cociente entre la superficie de la envolvente expuesta **Se** y el volumen habitable **V**. **Cf** está directamente relacionado con demandas de energía de calefacción en una vivienda. Mientras mayor es el coeficiente de forma (para idéntico volumen habitable), mayor tiende a ser la demanda de energía de calefacción de la vivienda."

La recomendación para las viviendas Passivhaus en Europa central es tener una forma bien compacta, para minimizar las pérdidas de calor por la envolvente expuesta al exterior. Para estudiar la influencia del factor forma con respecto a la demanda energética, se analizan, en una primera instancia, tres formas distintas en el clima de Concepción. Los tres casos tienen una superficie útil de 100 m² y un volumen de 250 m³. La primera forma, es un cubo con una planta cuadrada y de dos pisos, la segunda, igualmente tiene una planta cuadrada pero de un piso. La tercera forma, representa una geometría irregular en forma de U de un piso. A continuación, se muestran, las tres formas en la tabla 3-6 con sus factores forma.

Tabla 3-6: Distintas formas de casas aisladas con sus factores forma (elaboración propia).

2 Pisos forma Cubo	1 Pisos forma Cuboide	1 Piso forma U
Factor forma $Se/V=0.97$	Factor forma $Se/V=1.2$	Factor forma $Se/V=1.36$
		

Se realizan simulaciones térmicas con los tres cuerpos, los cuales cuentan con las mismas materialidades y no contemplan superficies vidriadas.

Los resultados de las simulaciones se muestran en la tabla 3-7. Como ya se ha mencionado anteriormente, aumenta la demanda energética en calefacción considerablemente con una forma irregular. La forma U tiene una demanda en calefacción, de aproximadamente 10 kWh/(m²a) más alta, que la forma compacta. La forma cubo de un piso representa un valor intermedio. Ninguna de las formas presenta una demanda energética en refrigeración, dado que, no hay ganancias solares por el hecho de no considerar ventanas y las ganancias internas pueden ser extraídas a través de ventilación.

Tabla 3-7: Factor forma y consumo en energía para calefacción y refrigeración (elaboración propia).

	Se/V	Q calefacción	Q refrigeración
	[-]	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]
2 Pisos forma Cubo	0,97	14,49	0
1 Piso forma Cuboide	1,20	20,47	0
1 Piso forma U	1,36	23,58	0

Para la realización del estudio paramétrico, se eligieron, las dos formas extremas y no se considera la forma intermedia, para reducir la cantidad de los casos a estudiar. Por un lado se elige la forma cubo de 2 pisos, la cual representa una forma compacta y por el otro lado la forma U de un piso, la cual representa una forma irregular. Los niveles del parámetro Geometría se muestran en la tabla 3-8.

Tabla 3-8: Niveles del parámetro geometría (elaboración propia).

	1	2
Factor forma / geometría	Compacto	Irregular

La forma U tiene su fachada principal (fachada norte) en el lado cerrado hacia el exterior, como indicado en la tabla 3-6. El “patio” tiene la orientación hacia el sur. Las ventanas están distribuidas en las fachadas exteriores, no hacia el patio, para evitar efectos de sombra, producidos por las otras fachadas hacia las ventanas. Esta distribución permite la comparación entre las formas, dado que, siempre obtienen una ganancia solar igual.

Los dos cuerpos cuentan con una superficie vidriada hacia el sur, la cual no varía. Las superficies vidriadas hacia el sur no entregan ganancias solares al edificio, por no captar radiación solar por el ángulo del sol. Por esta razón, se considera una superficie vidriada “sur” relativamente pequeña. No se eliminan los elementos transparentes hacia el sur para aprovechar la iluminación natural. La superficie vidriada es de 3,5 m², la cual representa el 10% de la fachada sur.

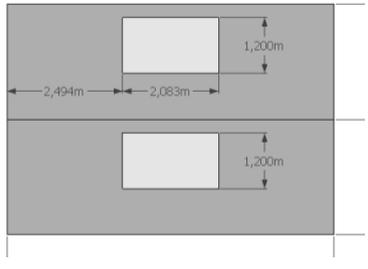
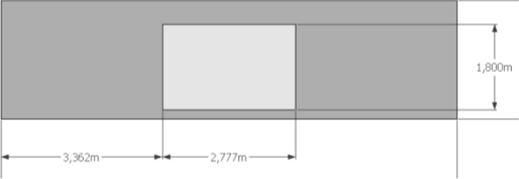
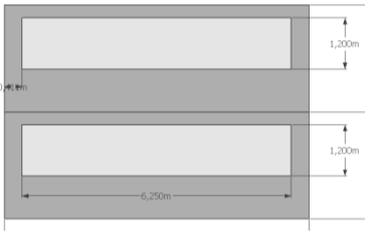
3.2.4 Superficie vidriada de la fachada al este igual que al oeste

El tamaño de las superficies transparentes determinan, en conjunto con las propiedades de la superficie y su orientación, las ganancias solares y lumínicas. Además, el tamaño tiene una influencia en la transmitancia térmica de la envolvente, dado que, las superficies transparentes, en general, no cuentan con una resistencia térmica alta, en comparación a los muros y techumbres. Por lo tanto, generalmente, superficies vidriadas grandes presentan, por una parte, una pérdida de calor alta, pero por otra parte, presentan ganancias solares igualmente altas. No obstante, la meta es encontrar el equilibrio entre el tamaño y el tipo de las ventanas para reducir la demanda energética total. En verano, en los climas calurosos, como por ejemplo en Santiago, es altamente probable, que una ventana grande, provoque un sobrecalentamiento o una demanda en refrigeración alta, lo que en invierno, representa una ventaja, por sus ganancias solares, por lo tanto, para encontrar el equilibrio, hay que analizar, la suma en refrigeración y calefacción.

Las superficies transparentes al este y oeste captan la radiación solar en las mañanas y en las tardes respectivamente, con un ángulo bajo del sol, por lo tanto, será difícil protegerlas con elementos de sombra fijos. Para evitar un sobrecalentamiento en verano, no se considera en el estudio paramétrico, un porcentaje vidriado más elevado que en un 40% del muro.

Los niveles del parámetro superficie vidriada al oeste igual que al este se muestran en la tabla 3-9.

Tabla 3-9: Niveles del parámetro superficies de las ventanas al este igual que al oeste de 15% y 40% y su distribución geométrica en las dos formas investigadas (elaboración propia).

	2 Pisos forma Cubo	1 Piso forma U
Ventanas al este y oeste de 5 m ² (~15%)		
Ventanas al este y oeste de 15 m ² (~40%)		

3.2.5 Superficie vidriada de la fachada norte

Las superficies transparentes hacia el norte, captan la radiación solar del mediodía, sobre todo en invierno. Por este razón, una de las recomendaciones para construir casas Passivhaus en Europa central, es el aumento de las superficies vidriadas hacia el ecuador hasta el máximo, para maximizar las ganancias solares.

Con las superficies transparentes hacia el norte, hay que buscar igualmente, el equilibrio entre tamaño, calidad del vidrio y orientación, para minimizar la demanda energética total, la cual es la suma entre demanda en refrigeración y calefacción. Para los climas fríos, suelen ser ventanas grandes una buena solución y para climas calurosos, ventanas pequeñas. Las ventanas hacia el norte, pueden ser protegidas de la radiación solar en verano, con elementos de sombra horizontal, como aleros o balcones.

Para el estudio paramétrico, se eligen tres tamaños diferentes para las ventanas norte. El porcentaje más alto es de 70% de superficie vidriada, lo que representa una fachada completamente vidriada, dado que, el 30% de superficie restante, representa los perfiles y marcos de las ventanas. Se eligió el porcentaje más pequeño de 15%, para permitir una iluminación natural. Los niveles del parámetro superficie vidriada norte se muestra en la tabla 3-10.

Tabla 3-10: Niveles del parámetro superficies de las ventanas al norte de 15%, 40% y 70% y su distribución geométrica en las dos formas investigadas (elaboración propia).

	2 Pisos forma Cubo	1 Piso forma U
Ventanas al norte de 5 m ² (~15%)		
Ventanas al norte de 15 m ² (~40%)		
Ventanas al norte de 25 m ² (~70%)		

3.2.6 Alero o balcón como elemento de protección solar para la fachada norte

No es posible diseñar un edificio pasivo sin atender a cómo proteger del sol indeseado en verano (Crespo, et al., 2011). No puede evaluarse, el efecto de un buen aislamiento y una buena estanqueidad, sin partir de la premisa de que el edificio no debe sobrecalentarse, por efecto, de la entrada de radiación solar no deseada; todos estos fenómenos deben evaluarse conjuntamente para poder realizar un buen diseño pasivo.

En el clima de la ciudad de Santiago existe un cierto riesgo, de que los espacios interiores de una casa se sobrecalienten y produzcan así, una demanda energética en refrigeración. Este es poco probable en las ciudades de Concepción y Puerto Montt.

La captación solar por ventanas es favorable en periodos fríos y desfavorable en periodos calurosos (Bustamante, et al., 2009). En general, en nuestros climas es entonces recomendable orientar ventanas al norte y evitar ventanas al oriente-poniente para evitar sobrecalentamiento en periodos de alta radiación solar. En primer lugar, para evitar que la radiación solar incidente se transfiera hacia el interior, debe protegerse la ventana o cualquier otro elemento vidriado por el exterior. De este modo se impide que se provoque el efecto invernadero. La radiación del sol que ingresa a la vivienda, es transformada en calor por absorción en los materiales del interior y luego estos emiten radiación de onda larga. En orientación norte, la protección de elementos vidriados es posible, a través, de aleros o elementos horizontales en ventanas.

Se evalúa en el estudio paramétrico, la influencia de un elemento horizontal fijo de protección solar, para las superficies vidriadas de la fachada norte. Un elemento fijo horizontal, puede ser un alero o un balcón. Se determina el tamaño de estos elementos, en general, con el objetivo, de permitir la entrada de radiación solar en invierno al máximo, por su ángulo del sol más bajo y evitar su ingreso en verano, dado que el ángulo del sol es más alto.

En el estudio paramétrico, se considera un balcón, como elemento de sombra horizontal para la fachada norte, en el primer piso, de 1,5 m de ancho. En el segundo, para facilitar la comparación, un alero, de igualmente 1,5 m de ancho. Primero, se analizan los casos sin esta protección solar horizontal y luego con la protección solar, como se muestra en la tabla 3-11.

Tabla 3-11: Niveles del parámetro alero norte (elaboración propia).

	1	2
Alero norte	Si	No

3.2.7 Elementos de protección solar en verano de las superficies vidriadas en las fachadas este y oeste

Como ya se ha descrito en el punto anterior, la misma situación de los elementos de sombra para la fachada norte, ocurren en las fachadas este y oeste. Para maximizar las ganancias solares en invierno, es conveniente tener superficies vidriadas de un gran tamaño, pero estas provocan en verano el riesgo de sobrecalentamiento. Para no reducir las superficies transparentes, es también altamente recomendable, para las fachadas este y oeste, instalar elementos de protección solar. Por el ángulo del sol sobre las superficies este y oeste, no es conveniente instalar una protección solar horizontal. Sin embargo, se pueden instalar elementos verticales fijos o elementos móviles. Los elementos móviles presentan la ventaja, de que se puede activar en épocas calurosas y desactivar en épocas frías, para captar la radiación solar.

Los elementos móviles o fijos presentan un mejor desempeño, si están instalados en el exterior de la ventana, dado que, así no permiten el ingreso de las ondas solares al recinto. Si por razones estéticas, económicas o ambientales (vientos fuertes) no es posible colocar la protección solar al exterior, es conveniente colocarla al interior que es mejor que no colocarla.

Para la evaluación de la influencia de una protección solar para las superficies vidriadas hacia el este y oeste, se incorpora, en el estudio, una protección solar móvil en el interior de las ventanas. Se utiliza un elemento interior, aunque su desempeño es menor, dado que en Chile no es común en el sector de la construcción de casas unifamiliares, instalar elementos de sombra móvil en el exterior, por lo tanto no hay una demanda en el mercado y por esta razón tienen un precio elevado. El elemento de sombra, representado por una persiana, cuenta con una reflectancia solar de 0,8 y se activa en verano con una temperatura elevada del recinto y con una carga solar alta en la superficie exterior de la ventana.

Se realiza el estudio paramétrico una vez con los elementos de protección solar móviles para las superficies transparentes hacia el este y oeste, y otra vez sin esta protección, como se muestra en la tabla 3-12.

Tabla 3-12: Niveles del parámetro sombra temporal en verano de la superficie vidriada al este y oeste (elaboración propia).

	1	2
Sombra temporal este/oeste	Si	No

3.2.8 Tipo de los elementos vidriados

Las ventanas o el tipo de los vidrios son fundamentales, para aprovechar la energía solar pasiva. Las ventanas permiten que entre la radiación solar a la casa y eviten, junto con los elementos opacos de la envolvente, la pérdida de calor. Se puede clasificar una superficie transparente, a través de sus propiedades. Las propiedades más importantes para clasificarla son: la transmitancia térmica, la transmisividad solar y la transmisividad lumínica. En el sector de la construcción se utilizan vidrios simples o sistemas de vidrios compuestos, como doble vidriado hermético, triple vidriado hermético hasta quádruple vidriado hermético. Los últimos son un compuesto de vidrios simples que conforman una, dos o tres cámaras herméticas, rellenas con aire o un gas noble. En el mercado existen vidrios con una variedad enorme para distintos requerimientos, como vidrios con colores, vidrios laminados, vidrios con capas de baja emisividad o vidrios con un tratamiento para la protección solar entre otros. Una óptima elección del conjunto de vidrios a utilizar en la construcción, permite minimizar la demanda energética. En general es recomendable buscar un equilibrio, entre ganancias solares, lumínicas y transmitancia térmica, para minimizar la demanda energética en calefacción y refrigeración.

Aparte del balance energético del vidrio o de la superficie transparente, existen otras limitaciones al momento de elegir el tipo del vidrio. Una de las limitaciones son las normas vigentes, las cuales, no siempre, permiten el uso del vidrio deseado. La reglamentación térmica vigente en Chile por ejemplo (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2011), sólo permite el uso de vidrios simples hasta un porcentaje máximo de superficie de ventanas respecto a los elementos verticales de la envolvente. Por otra parte, existen criterios recomendados por normas nacionales, internacionales o recomendaciones, como por ejemplo los valores mínimos para cumplir el estándar Passivhaus en Europa central. Estos criterios se fundan generalmente en las leyes de la física de la construcción, para evitar daños en la construcción o evitar peligros para la salud. Dos de estos criterios están descritos en el presente capítulo. El primero, es el criterio de confort por temperatura superficial mínima y el segundo, es el criterio de higiene, para evitar crecimiento de mohos.

Para lograr los criterios de confort y de higiene, hay que cumplir valores U máximos de 1,44 hasta 1,57 W/(m²K) entre Santiago y Puerto Montt como se muestra en la tabla 3-3. Estos valores no se cumplen con un vidrio simple, ni con un vidrio termopanel común. En la ilustración 3-5, según (Gustavsen and Jelle, 2007), se muestran valores U típicos de distintas configuraciones de vidrios.

El valor U total de una ventana incluye el vidrio, el marco y la unión entre vidrio y marco. El conjunto de estas partes constructivas, debe cumplir con los valores U máximos, para lograr los criterio de confort y de higiene.

Glazing U-value (W/(m ² K))				
Glazing Configuration (mm)		Cavity Gas		
		Air	Argon	Krypton
No low emissivity coating	4	5.8	-	-
	4-12-4	2.9	2.7	2.6
	4-12-4-12-4	2.0	1.9	1.7
Low emissivity coating	4-12-E4	1.6	1.3	1.1
	4-12-4-12-E4	1.3	1.0	0.8
	4E-12-4-12-E4	1.0	0.7	0.5

Ilustración 3-5: Valores típicos de U_g para sistemas de vidrio, los cuales dependen del vidrio, del gas en la cámara y de los números de capas de baja emisividad (Gustavsen and Jelle, 2007).

Para la ejecución del estudio paramétrico, se considera solamente la superficie vidriada, y no, el marco de las ventanas. Las medidas de las superficies vidriadas son, por lo tanto, sólo las superficies realmente transparentes y no el vano de las ventanas. Para el análisis económico, se considera un marco de PVC con tres huecos y hojas batientes o fijas, dado que, las ventanas correderas no logran el nivel de la hermeticidad requerida.

Se eligieron para el estudio dos tipos de vidrios. Primero, una composición de vidrios, la cual cumple con los criterios de confort y de higiene en las condiciones climáticas de las tres ciudades estudiadas. La composición del vidrio es un doble vidriado hermético de 4-12-E4 con un relleno con gas argón, una capa de baja emisividad, que logra un valor U de aproximadamente 1,3 – 1,5 W/(m²K) y un factor solar de 0,64. Este tipo de vidrio, ya es accesible en el mercado chileno, aunque, a un precio mayor que un vidrio termopanel común. Segundo un vidrio termopanel común, con un valor U de 2,9 W/(m²K) y un factor solar de 0,78, aunque esta ventana no cumple con los criterios de confort e higiene, pero, es muy accesible en el mercado nacional con precios razonables. Se pretende investigar, si es posible lograr el estándar Passivhaus con un vidrio termopanel común, por sus exigencias en la demanda energética. En la tabla 3-13, se muestran los dos niveles del parámetro “tipo de vidrio” elegido en el estudio.

Tabla 3-13: Niveles del parámetro tipo de ventanas y de elementos vidriados (elaboración propia).

	1	2
Tipo de ventanas	U=1,3 [W/m ² K], g=0,64 [-]	U=2,9 [W/m ² K], g=0,78 [-]

Se reduce el factor solar de los dos tipos de vidrios, según los criterios de (Feist, et al., 2007). La primera reducción es de un 5% por ensuciamiento del vidrio durante su vida útil y la segunda reducción es de un 25% por efectos de sombras no consideradas, como por ejemplo la profundidad del vano de las ventanas, cortinas en el interior de las ventanas como los visillos, las cuales tapan o ensombrecen partes de las ventanas. Se realiza esta reducción, para asegurar, que no se sobreestimen las ganancias solares en los casos estudiados.

3.2.9 Transmitancia térmica de elementos opacos de la envolvente

La transmitancia térmica U es, según (NCh853 of, 2007), el flujo de calor que pasa por unidad de superficie del elemento y por grado de diferencia de temperaturas entre los dos ambientes separados por dicho elemento.

Con este parámetro, se pretende determinar una recomendación para la transmitancia térmica de las diferentes partes de la envolvente, para lograr el estándar Passivhaus en tres ciudades diferentes, en el centro sur de Chile. Además, se pretende determinar valores U recomendados para muros, techumbres y pisos para realizar construcciones Passivhaus en Santiago, Concepción y Puerto Montt. El valor U, o la transmitancia térmica, son independientes de la materialidad de la construcción. Por ejemplo, para lograr un valor U en un muro de hormigón, al igual que en un muro de madera sólida, hay que agregar más aislación térmica en el muro de hormigón, dado que, la madera es un mejor aislante térmico. En el presente estudio, se separa la transmitancia térmica de la materialidad. La influencia de la materialidad, se aborda a través de la inercia térmica, la cual se describe en el siguiente subcapítulo.

“Uno de los principios básicos del estándar Passivhaus es conseguir que sus edificios funcionen de forma pasiva – como un termo- conservando el calor o el frío, gracias al aislamiento térmico, a diferencia de un edificio convencional que emplearía sistemas activos para mantener el calor – como una cafetera- que utiliza una resistencia eléctrica (Crespo, et al., 2011). ... El estándar “Passivhaus no exige un espesor de aislamiento, sino que, limita las demandas de calefacción, refrigeración,... Según el estudio Passive-On en España, se recomienda un valor U de 0,3 W/(m²K) para alcanzar la relación óptima de eficiencia.”

Para determinar los niveles de los valores U, los cuales se pretenden investigar con el estudio paramétrico, se realizaron simulaciones térmicas previas, en las tres ciudades estudiadas. Se variaron los valores U desde 1,0 a 0,1 W/(m²K) cada 0,1 W/(m²K) y se determinó, desde cual punto es posible calefaccionar y refrigerar, sólo a través del flujo del aire exterior para lograr el estándar Passivhaus. En las ciudades de Santiago y Concepción, se logró el estándar con valores U de aproximadamente 0,4-0,5 W/(m²K) y en Puerto Montt con valores de aproximadamente 0,3-0,4 W/(m²K). Se amplifica el rango para el estudio paramétrico, y se determinan los valores U según la tabla 3-14. Se varían los valores U de los muros entre 0,5 y 0,2 W/(m²K), los de las techumbres entre 0,4 y 0,16 W/(m²K) y los de los radiers entre 0,64 y 0,34 W/(m²K).

Tabla 3-14: Niveles del parámetro transmitancia térmica de los elementos de la envolvente a variar en el estudio (elaboración propia).

Transmitancia térmica	(U=0,5)	(U=0,35)	(U=0,2)
	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
Muro	U= 0,50	U= 0,35	U= 0,20
Techumbre	U= 0,40	U= 0,28	U= 0,16
Radier	U= 0,64	U= 0,64	U= 0,34

3.2.10 Inercia térmica de la construcción

Los factores más importantes, para determinar la demanda energética en calefacción en una casa pasiva, son, según (Passivhausinstitut, 2009), la aislación térmica de la envolvente y pérdidas por ventilación e infiltración. Por otra parte, la inercia térmica de las superficies hacia el interior, como entrepisos y muros interiores provocan una influencia importante para amortiguar la amplitud térmica, en verano, sobre todo en climas cálidos.

La inercia térmica o la capacidad de los materiales para almacenar calor, actúan al interior de una vivienda, tendiendo a disminuir variaciones dinámicas de temperatura en su entorno inmediato (Monárdez and Sarzosa, 2007). Se puede observar, que sobre toda la vivienda existen fluctuaciones diarias de temperatura, fluctuaciones de intensidad de la radiación solar, e incluso, el uso de la vivienda no es regular a lo largo del día, por ende, la transmitancia térmica no basta para comprender el comportamiento térmico de una vivienda. Al considerar el régimen dinámico, la inercia térmica expresa una oposición propia a ese cambio de estado o de régimen, producto de las fluctuaciones que la afectan, y gracias a ella, estas pueden ser disipadas al interior de la vivienda. La inercia térmica consiste entonces, en una acumulación de calor y una restitución posterior por radiación, así, construir con gran inercia es

usar materiales adecuados, a fin de, almacenar calor proveniente de la radiación solar principalmente y atenuar las variaciones de la temperatura interior del aire.

Se pretende a través de este parámetro, analizar la influencia de la inercia térmica a la demanda energética y al cumplimiento del estándar Passivhaus en tres ciudades en el centro sur de Chile. Por consiguiente, se investigan dos niveles de la inercia térmica, un nivel con una inercia térmica baja y otro nivel con una inercia térmica alta. El nivel de la inercia térmica alta es representado por una construcción en hormigón armado con un espesor de 150mm y con una aislación térmica al exterior, la cual cuenta con un espesor variable, según el nivel de la transmitancia térmica elegida. El nivel de la inercia térmica baja, es representado por una construcción de madera. Se eligió el sistema constructivo de madera sólida con una aislación térmica por el lado exterior, con un espesor variable según el nivel de la transmitancia térmica elegida. Los detalles de la composición de los elementos constructivos, se encuentra en el Anexo A del presente trabajo. En la tabla 3-15 se muestran los niveles del parámetro “inercia térmica”.

Tabla 3-15: Niveles del parámetro “inercia térmica” de elementos opacos de la envolvente (elaboración propia).

	1	2
Inercia térmica	baja	alta

3.2.11 Sistema de ventilación con o sin recuperación de calor

Según las recomendaciones descritas en el punto 3.1.2: “Parámetros elegidos, para analizar su influencia en el comportamiento energético-térmico de los casos de estudio”, es altamente recomendable en Europa central, incorporar un sistema de ventilación con recuperación de calor, para lograr el estándar Passivhaus.

Dado que, la envolvente de los casos de estudio es altamente hermética, hay un intercambio mínimo de aire por infiltración, por lo tanto, hay que renovar el aire por ventilación. Una ventilación, a través, de la apertura de ventanas, no es generalmente suficiente, para garantizar una calidad de aire aceptable, sobre todo en invierno, donde el usuario trata de no abrir las ventanas, para evitar que entre aire frío. Se incorpora, por este punto, y por el hecho, de que se pretende climatizar la casa Passivhaus sólo por el pre-tratamiento del aire inyectado en la casa, en todos los casos de estudio un sistema de ventilación, ya sea sin recuperación de calor o con recuperación de calor, para garantizar una calidad de aire interior adecuada. Se ventila con un caudal de aire de 30 m³ por persona y por hora, lo que significa aproximadamente 0,7 renovaciones de aire por hora.

En el presente estudio, se pretende aclarar la influencia de un intercambiador de aire-aire, incorporado en un sistema de ventilación para recuperar el calor del aire interior y así reducir las pérdidas de calor por ventilación. En los climas, con un invierno severo, como en Europa central, se observó, que una recuperación de calor presenta un rendimiento alto, y se pretende estudiar este rendimiento en climas no tan severos como en las tres ciudades en Chile, Santiago, Concepción y Puerto Montt. En el estudio se varía el parámetro de recuperación de calor en los dos niveles: El sistema de ventilación “Sí” cuenta con recuperación de calor o “No” cuenta.

Los sistemas de ventilación, los cuales cuentan con recuperación de calor, incorporan en el estudio un intercambiador de calor de contraflujo, con un rendimiento de aproximadamente un 80%. Además, se incorpora en el estudio un bypass para el intercambiador de calor en verano, dado que, la recuperación de calor, puede aumentar la temperatura interior en verano y así favorecer un sobrecalentamiento. El tipo de bypass es uno con control manual, el cual se activa en verano manualmente y se desactiva en invierno. Se determina para cada ciudad estudiada, a través de simulaciones térmicas, el periodo en el cual se activa el bypass y se muestra en la tabla 3-16.

Tabla 3-16: Calendario de recuperación de calor y del bypass del intercambiador de calor (elaboración propia).

	Verano	Invierno
	Sin recuperación de calor (bypass activado)	Con recuperación de calor (bypass desactivado)
Santiago	15.10 – 15.4	15.4 – 15.10
Concepción	1.11 – 1.3	1.3 – 1.11
Puerto Montt	1.12 – 1.3	1.3 – 1.12

En la tabla 3-17, se muestran los niveles del parámetro “recuperación de calor” Sí o No. Con este parámetro, se pretende analizar la influencia de un sistema de ventilación con recuperación de calor en el clima del centro sur de Chile.

Tabla 3-17: Niveles del parámetro del sistema de ventilación con o sin recuperación de calor (elaboración propia).

	1	2
Ventilación con recuperación de calor	Si	No

3.2.12 Intercambiador de calor subsuelo-aire

Un intercambiador de calor subsuelo-aire, también, llamado pozo canadiense, pozo provenzal o intercambiador tierra-aire, utiliza el subsuelo para el enfriamiento y calentamiento de una corriente de aire, que circula por un sistema de tubos enterrados para tal fin. De este modo, se puede reducir la temperatura del aire que pasa por el sistema de tubos en verano antes de que entre en la casa e inversamente aumentar la temperatura en invierno.

Con el fin de mejorar, energéticamente, los sistemas de ventilación y de incrementar de forma decisiva el confort de la vivienda, gracias al efecto de refrescamiento en verano, a menudo se pre-conecta un intercambiador de calor aire-tierra al sistema de ventilación. Las instalaciones de un intercambiador de calor aire-tierra sirven, además, para el precalentamiento del aire en invierno, previniendo la formación de escarcha en el intercambiador de calor del aparato de ventilación, dado que, se precalienta el aire exterior sobre los 0°C. El dimensionamiento de un intercambiador aire-tierra está determinado, sobre todo, por los parámetros siguientes (en paréntesis los valores utilizados en el presente estudio):

- Caudal volumétrico de aire (~ 140 m³/h).
- Profundidad de montaje (~ 1,5 m).
- Largo de los tubos (~ 30 m).
- Material del tubo (~ PVC).
- Valores característicos del subsuelo (~pesado y húmedo).
- Clima en el emplazamiento de la instalación (Santiago, Concepción, Puerto Montt).

Se determinaron los valores utilizados en el estudio, sobre todo el largo de los tubos, el diámetro y su profundidad, a través de, simulaciones térmicas, con la incorporación de un “ZONEEARTH TUBE” en el modelo de EnergyPlus.

Con el parámetro “intercambiador de calor subsuelo-aire”, se pretende aclarar su influencia tanto en la demanda energética, como en el cumplimiento del estándar Passivhaus en tres ciudades del centro sur de Chile. Se muestran los niveles del parámetro en tabla 3-18.

Tabla 3-18: Niveles del parámetro intercambiador de calor subsuelo-aire (elaboración propia).

	1	2
Intercambiador de calor subsuelo-aire	Si	No

3.3 Determinación de los niveles de los parámetros para los casos de referencia según reglamentación térmica

3.3.1 Ubicación, orientación, factor forma, superficie vidriada al oeste este norte, protección solar para la fachada norte y protección solar para la fachada este y oeste para los casos de referencia

Se analiza, para cada caso de estudio, su respectivo caso de referencia. Se puede analizar después, a través de esta metodología, la diferencia de la demanda energética, de los costos de inversión y de los costos de operación, entre una casa común y una casa Passivhaus.

Los casos de referencia cuentan con la misma configuración de los parámetros geométricos o del diseño arquitectónico, que los casos de estudio. Esto significa, que los parámetros: Ubicación, Orientación, Factor forma, Superficie vidriada al oeste/este, Superficie vidriada al norte, Protección solar norte y Protección solar este/oeste, muestran exactamente, en los casos de referencia, el mismo nivel, que sus respectivos casos de estudio. Los otros parámetros como: Tipo de vidrio, Transmitancia térmica de la envolvente, Inercia térmica, Ventilación con o sin recuperación de calor e Intercambiador de calor subsuelo-aire, tienen el nivel correspondiente a la reglamentación térmica RT (MINVU, 2006), o a una configuración general, la cual se define en los siguientes puntos: las exigencias para el tipo de vidrio y para la transmitancia térmica de la envolvente, cambian, según la ciudad, donde está ubicado el caso de estudio, dado que, las ciudades estudiadas están ubicadas en diferentes zonas térmicas de la RT.

Las condiciones bordes, para las simulaciones de los casos de referencia, coinciden con las condiciones bordes para los casos de estudio, con las siguientes excepciones: se fijan los valores de las ganancias internas y las renovaciones de aire por ventilación e infiltración, según criterios de (Bustamante, et al., 2009) y de los criterios para la certificación energética de las viviendas en Chile, utilizados en el software CCTE V2 (MINVU, 2008).

Se fijan las renovaciones de aire en 1,0 renovaciones por hora por ventilación e infiltración. Los casos de estudio poseen una renovación de aire de aproximadamente 0,7 cambios de aire por hora. Se logra este valor más bajo por sus exigencias altas en la hermeticidad de la envolvente.

Se fija un valor de 5 W/m^2 para las ganancias internas según (EnEV2009, 2008), lo cual es un poco más bajo que el valor de $6,67 \text{ W/m}^2$ propuesto por (Bustamante, et al., 2009) para viviendas sociales, dado que, los casos de estudio están diseñado por la misma cantidad de personas por vivienda, pero con una superficie útil más elevada en comparación a una vivienda social. Los casos de estudio presentan una ganancia interna reducida de $2,9 \text{ W/m}^2$,

por el supuesto uso de equipos eficientes como refrigeradores o ampolletas según el estándar Passivhaus y para no sobreestimar las ganancias internas y así asegurar que la vivienda siempre presenta un confort interior adecuado, aunque no todos sus habitantes están en la casa.

3.3.2 Tipos de elementos vidriados de los casos de referencia

La reglamentación térmica (MINVU, 2006), limita el porcentaje máximo de superficie de ventanas, con respecto a paramentos verticales de la envolvente: El complejo de ventana deberá cumplir con las exigencias establecidas en la Ilustración 3-6, en relación al tipo de vidrio y a la zona térmica en la cual se emplace el proyecto de arquitectura.

Para determinar el porcentaje máximo de superficie de ventanas de un proyecto de arquitectura, se deberá realizar el siguiente procedimiento:

- a) Determinar la superficie de los paramentos verticales de la envolvente del proyecto de arquitectura. La superficie total a considerar para este cálculo, corresponderá a la suma de las superficies interiores de todos los muros perimetrales, que considere la unidad habitacional, incluyendo los medianeros y muros divisorios.
- b) Determinar la superficie total de ventanas del proyecto de arquitectura correspondiente a la suma de la superficie de los vanos del muro en el cual está colocada la ventana, considerando, para ello, el marco como parte de su superficie.

La superficie máxima de ventanas que podrá contemplar el proyecto de arquitectura corresponderá a la superficie que resulte de aplicar la Ilustración 3-6, respecto de la superficie de los paramentos verticales de la unidad habitacional señalada en el punto a) precedente, considerando la zona y el tipo de vidrio que se especifique.

VENTANAS			
ZONA	% Máximo de Superficie Vidriada Respecto a Paramentos Verticales de la Envolvente		
	Vidrio Monolítico (b)	DVH Doble Vidriado Hermético (c)	
		3.6 W/m ² K ≥ U > 2.4 W/m ² K (a)	U ≤ 2.4 W/m ² K
1	50%	60%	80%
2	40%	60%	80%
3	25%	60%	80%
4	21%	60%	75%
5	18%	51%	70%
6	14%	37%	55%
7	12%	28%	37%

Ilustración 3-6: Porcentaje máximo de superficie vidriada respecto a paramentos verticales de la envolvente (MINVU, 2006).

En la tabla 3-19, se muestran los valores U máximos permitidos de las ventanas, con las configuraciones posibles de las superficies vidriadas variadas en el estudio paramétrico, considerando la zona térmica correspondiente. La determinación detallada se adjuntó en el Anexo A.

Tabla 3-19: Posibles configuraciones de las superficies vidriadas de los casos de referencia y los valores U máximos correspondientes según RT (elaboración propia).

Configuraciones posibles		U máximo ventana		
Este + Oeste	Norte	Zona 3	Zona 4	Zona 6
[%]	[%]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]
~15	~15	5,8	5,8	3,6
~15	~40	3,6	3,6	3,6
~15	~70	3,6	3,6	3,6
~40	~15	3,6	3,6	3,6
~40	~40	3,6	3,6	2,4
~40	~70	3,6	3,6	2,4

Se puede observar, que se puede aplicar, en Santiago y Concepción, vidrios simples con un valor U de 5,8 W/(m²K), cuando las superficies vidriadas son relativamente pequeñas. Con un aumento de la superficie vidriada, hay que mejorar la calidad de las ventanas para cumplir con las exigencias de la reglamentación térmica. En Puerto Montt hay que utilizar para superficies vidriadas grandes, una ventana termopanel con una capa de baja emisividad. Los tipos de vidrio utilizados en el estudio para los casos de referencia se muestran en la tabla 3-20.

Se reduce el factor solar de los vidrios para los casos de referencia, al igual que para los casos de estudio según los criterios de (Feist, et al., 2007). La primera reducción es de un 5% por ensuciamiento del vidrio durante su vida útil y la segunda reducción es de un 25% por efectos de sombras no consideradas, como por ejemplo del vano de las ventanas, cortinas en el interior de las ventanas como los visillos, las cuales tapan partes de las ventanas. Se realiza esta reducción para asegurar, que no se sobreestimen las ganancias solares en los casos estudiados, al igual que, para los casos de estudio.

Tabla 3-20: Tipo de vidrios utilizados para los casos de referencia (elaboración propia).

	Valor U	Valor g
	[W/m ² K]	[-]
Tipo 1 (vidrio simple 4mm)	5,8	0,89
Tipo 2 (vidrio doble hermético con 12mm cámara de aire)	2,9	0,78
Tipo 3 (vidrio doble hermético con 12mm cámara de aire y una capa de baja emisividad)	1,8	0,74

3.3.3 Transmitancia térmica de los elementos opacos de la envolvente, e inercia térmica de la construcción de los casos de referencia

Los elementos de la envolvente opaca exterior, de los casos de referencia, deben cumplir con las exigencias de la reglamentación térmica RT. Esto significa, que las configuraciones de los casos de referencia, cambian según su ubicación climática. Los casos de referencia ubicados en Santiago, deben cumplir con las exigencias para la zona térmica 3, los de Concepción con los de la zona térmica 4 y los de Puerto Montt con las exigencias de la zona térmica 6.

Los complejos de techumbres, muros perimetrales y pisos inferiores ventilados, entendidos como elementos que constituyen la envolvente de la vivienda, deberán tener, según reglamentación térmica (MINVU, 2006) una transmitancia térmica “U” igual o menor, o una resistencia térmica total “Rt” igual o superior, a la señalada para la zona que le corresponda al proyecto de arquitectura, de acuerdo con los planos de zonificación térmica, aprobados por resoluciones del Ministro de Vivienda y Urbanismo y a la ilustración 3-7.

ZONA	TECHUMBRE		MUROS		PISOS VENTILADOS	
	U W/m ² K	Rt m ² K/W	U W/m ² K	Rt m ² K/W	U W/m ² K	Rt m ² K/W
1	0,84	1,19	4,0	0,25	3,60	0,28
2	0,60	1,67	3,0	0,33	0,87	1,15
3	0,47	2,13	1,9	0,53	0,70	1,43
4	0,38	2,63	1,7	0,59	0,60	1,67
5	0,33	3,03	1,6	0,63	0,50	2,00
6	0,28	3,57	1,1	0,91	0,39	2,56
7	0,25	4,00	0,6	1,67	0,32	3,13

Ilustración 3-7: Exigencias de acondicionamiento térmico por zonas térmicas (MINVU, 2006).

El sistema constructivo, de los muros de los casos de referencia, es de ladrillo, con aislación térmica en el exterior, como se muestra en la ilustración 3-8. Se elige el ladrillo como sistema constructivo, dado que, es el material preferentemente utilizado en Chile según (Guerrero Herrera and INE, 2003), para casas del sector socioeconómico, en el cual se pretende ingresar con los casas Passivhaus. La techumbre está formada por vigas de madera, con una aislación térmica de lana de vidrio, como se muestra en la ilustración 3-9. El radier es de 10 cm de hormigón armado sin aislación térmica, dado que, la reglamentación térmica no exige aislación en los pisos no ventilados. El entrepiso igualmente es de 10 cm de hormigón armado.

Se determina el espesor de la aislación térmica de los muros y techumbres, según las necesidades para cumplir las exigencias de la reglamentación térmica, las cuales se muestran en la ilustración 3-7. Se adjunta la determinación detallada de los espesores de la aislación térmica, para cada tipo de envolvente de los casos de referencia, según su zona térmica en el Anexo A.

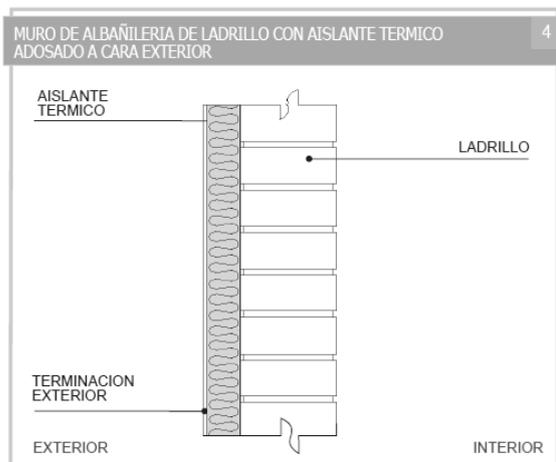


Ilustración 3-8: Muro de ladrillo macizo con aislación térmica y estuco (MINVU, 2006).

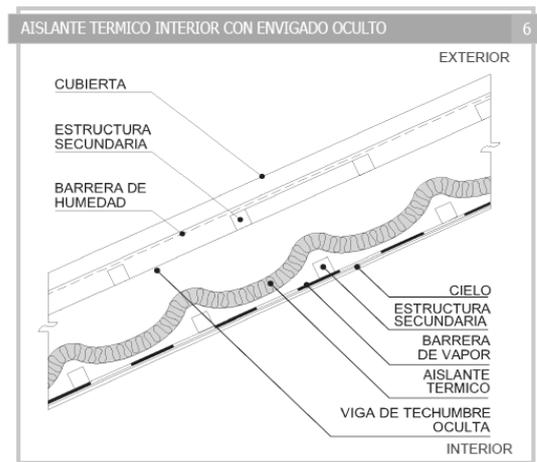


Ilustración 3-9: Techumbre con vigas de madera con aislación térmica (MINVU, 2006).

3.3.4 Sistema de ventilación con o sin recuperación de calor e intercambiador de calor subsuelo-aire para los casos de referencia

No se incluye, en el análisis de los casos de referencia, un sistema de ventilación mecánica, dado que, las construcciones comunes en Chile, no cuentan con un sistema de ventilación y la normativa no exige la instalación de uno. Por el mismo motivo, tampoco se incluye en el análisis de los casos de referencia un intercambiador de calor tierra-aire.

3.4 Resumen de los parámetros y sus distintos niveles determinados para el estudio

Se muestra en la ilustración 3-10, un diagrama de los parámetros a investigar con sus niveles determinados. En la parte superior, se encuentran los parámetros, los cuales son iguales tanto en los casos de estudio como en los casos de referencia. En la parte inferior se muestran dos vías, la primera representa los casos de estudio y la segunda los casos de referencia, dado que, dentro de estos parámetros hay una variación en los niveles, entre casos de estudio y casos de referencia. Esto significa, que en estos parámetros, sólo varían los niveles de los casos de estudio. Los casos de referencia presentan en los parámetros inferiores, sólo un nivel fijo.

El número total de los casos de estudio analizados es de 20.736 y el número total de los casos de referencia es de 432. El número total de los casos de referencia es menor, dado que, ellos tienen cinco parámetros fijos y por lo tanto, menos variaciones que los casos de estudio.

Las simulaciones de los casos de estudio se realizan en dos etapas:

En la primera etapa, se analizan los 20.736 casos de estudio, para clasificarlos en casas que cumplen el estándar Passivhaus y casas que no lo cumplen. Esta clasificación se logra con un análisis, a través, de la implementación de un sistema de ventilación, que logra la climatización a través del flujo del aire exterior, tal cual como se ocupa generalmente en una casa pasiva. Se clasifica la casa como Passivhaus, si es posible climatizarla a través de este sistema, como descrito en el capítulo 2.1.3. Si la casa no logra cumplir el estándar Passivhaus, significa que el sistema de climatización no es capaz de lograr la temperatura deseada durante el año. Estas casas tendrán, por lo tanto, una demanda energética máxima fija, aunque las pérdidas aumentaran, dado que el sistema de climatización no cuenta con una mayor potencia. Esto significa, que el resultado de la demanda energética, de todas las casas que no cumplen el estándar, no será representativo, dado que, no se logró el confort térmico deseado.

Para la determinación de la demanda energética representativa, se analizan nuevamente, en una segunda etapa, los 20.736 casos de estudio, pero esta vez, con un sistema de calefacción ideal, sin límites en su potencia, para determinar la demanda energética de todos los casos, incluyendo aquellos que no logran con el estándar Passivhaus. Se realiza por lo tanto en el marco del estudio paramétrico, un total de 41.904 simulaciones térmicas dinámicas.

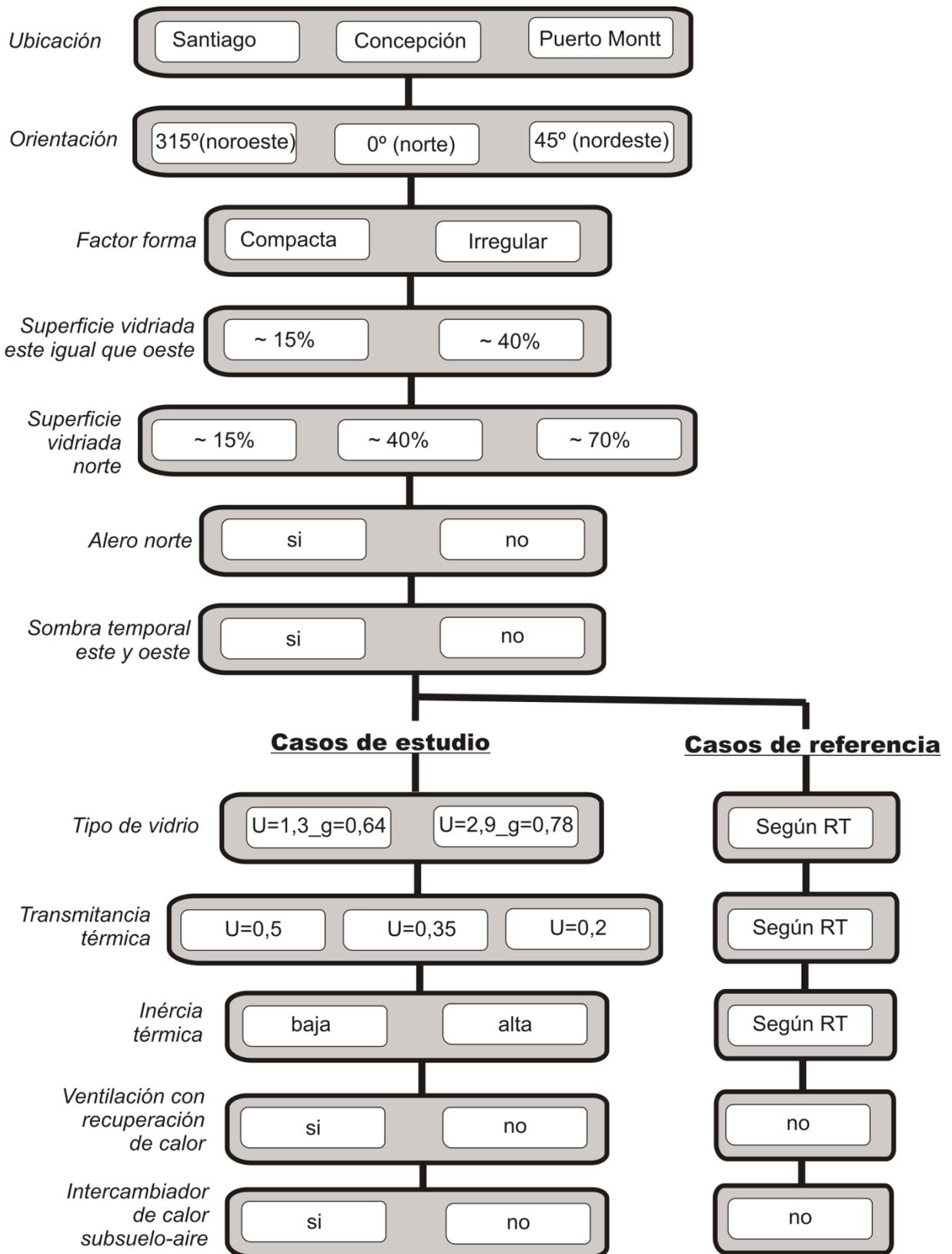


Ilustración 3-10: Diagrama de árbol de los parámetros y sus niveles (elaboración propia).

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO
PARAMÉTRICO EN RELACIÓN AL
DESEMPEÑO ENERGÉTICO

4 Análisis de los resultados del estudio paramétrico en relación al desempeño energético

4.1 Clasificación en los casos que lograron cumplir con el estándar Passivhaus y en los casos que no lograron cumplir con el estándar

4.1.1 Definición y clasificación

Tal como se menciona en el capítulo 1, la definición del estándar Passivhaus según (Feist, 2005) es: "Una casa Passivhaus es una edificación en la que el confort térmico se garantiza sólo por calentamiento o refrigeración del flujo de volumen del aire exterior, de acuerdo al volumen de intercambio requerido para garantizar la calidad del aire interior, sin utilizar ayuda adicional al aire recirculado."

Por lo tanto, si se pueden climatizar los casos de estudio sólo por calentamiento o refrigeración del flujo de aire fresco necesario, estos cumplen con el estándar Passivhaus. Para clasificar los casos, se pueden utilizar las horas del año cuando 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 suman las horas del año donde la temperatura es inferior de 20° C. En estas horas el sistema de climatización no es capaz de lograr el confort deseado. Los sistemas que utilizan el flujo de aire exterior del sistema de ventilación, sin recirculación para climatizar un recinto, tienen una potencia limitada. Con las condiciones descritas en el capítulo 1, se puede lograr, con una climatización a través del flujo de aire exterior 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 una potencia máxima total de refrigeración de 0,94 kW y de calefacción de 1,4 kW es similar al rango de la potencia máxima de un secador de pelo manual.

El número de horas del año, en las cuales no es posible calefaccionar o refrigerar a la temperatura deseada, se obtienen de las simulaciones térmicas con el software EnergyPlus V6 (EnergyPlus, 2010). Si estas horas del año superan un límite de tolerancia, implica que no se puede climatizar con el flujo del aire del sistema de ventilación y, por lo tanto, no cumple con el estándar Passivhaus. El estándar (ASHRAE 90.1-, 2004) menciona un límite de tolerancia de 300 horas para todos los tipos de construcciones. Dado que el estándar Passivhaus es un estándar de un alto confort interior, se reduce el nivel de la tolerancia en el presente estudio al 1% de las horas del año, que son 88 horas.

En el estudio se utiliza la siguiente nomenclatura:

Heating setpoint met [h/a]: Horas del año donde el sistema de calefacción alcanza la temperatura interior deseada (20° C).

Cooling setpoint met [h/a]: Horas del año donde el sistema de refrigeración alcanza la temperatura interior deseada (26° C).

4.1.2 Resumen de la clasificación

Se puede observar, que los casos de estudio tienen un comportamiento diferente en las diferentes ciudades estudiadas, puesto que cuentan con climas diferentes. Se requiere, por lo tanto, de otras estrategias de diseño para el Centro de Chile, con el fin de lograr el estándar Passivhaus, que para el sur del país. En Concepción se cumplieron más del 50% de los casos de estudio con los criterios del estándar Passivhaus (Tabla 4-1). En Santiago y Puerto Montt se cumplieron aprox. el 25% de los casos con el estándar, pero en las dos ciudades por las diferentes razones que se indican a continuación. Los casos en Santiago, generalmente no lograron ser climatizados a la temperatura deseada en verano y en Puerto Montt no lograron ser calefaccionados a la temperatura deseada en invierno. Los porcentajes obtenidos son propios del rango de los parámetros elegidos y cambiarán con otros rangos de los parámetros, pero permiten una comparación entre las ciudades.

Tabla 4-1: Resumen de los casos de estudio y su clasificación en grupos que cumplieron con los requisitos del estándar Passivhaus y grupos que no cumplieron en cantidad y porcentaje (elaboración propia).

		Santiago	Concepción	Puerto Montt
Casos en total		6912 (100%)	6912 (100%)	6912 (100%)
Heatingsetpoint met		5006 (72%)	4548 (66%)	1798 (26%)
Coolingsetpoint met		2179 (32%)	5644 (82%)	6540 (95%)
Heating and Coolingsetpoint met		1862 (27%)	3923 (57%)	1747 (25%)
Cumplen con el estándar Passivhaus	Si	1862 (27%)	3923 (57%)	1747 (25%)
	No	5050 (73%)	2989 (43%)	5165 (75%)

En la tabla 4-1 y en la ilustración 4-1 se pueden observar las diferencias entre las ciudades que cumplieron con el estándar.

Para cumplir con el estándar Passivhaus, los casos de estudio deben cumplir con los dos criterios, de calefacción y de refrigeración. Hay casos que cumplen sólo con el criterio de refrigeración. Estos casos tienen, en general, ventanas pequeñas, elementos de sombra y

una inercia térmica alta. Los mismos casos, por otra parte, no tienen una configuración favorable para el criterio de calefacción, dado que no tienen muchas ganancias solares. Por lo tanto hay que buscar un equilibrio entre las estrategias de verano/invierno para que los casos logren cumplir con los dos criterios.

En la ciudad de Santiago cumplieron en un 72% con el criterio de calefacción y sólo con un 32% con el de refrigeración. Los casos que cumplieron con los dos criterios representan un 27% de los casos analizados. En las ciudades ubicadas más al sur, tales como Concepción y Puerto Montt, aumenta la influencia del criterio de calefacción y baja la influencia del criterio de refrigeración. En Concepción con su clima equilibrado la tendencia es, que en el diseño de la casa se debe considerar en un grado mayor, la estrategia de bajar la demanda en calefacción no en, la de refrigeración.

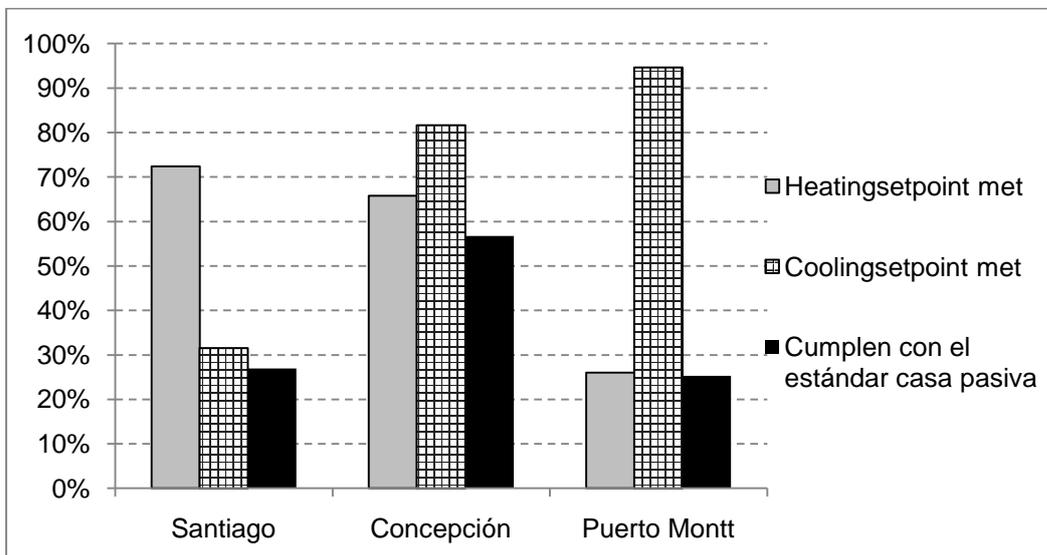
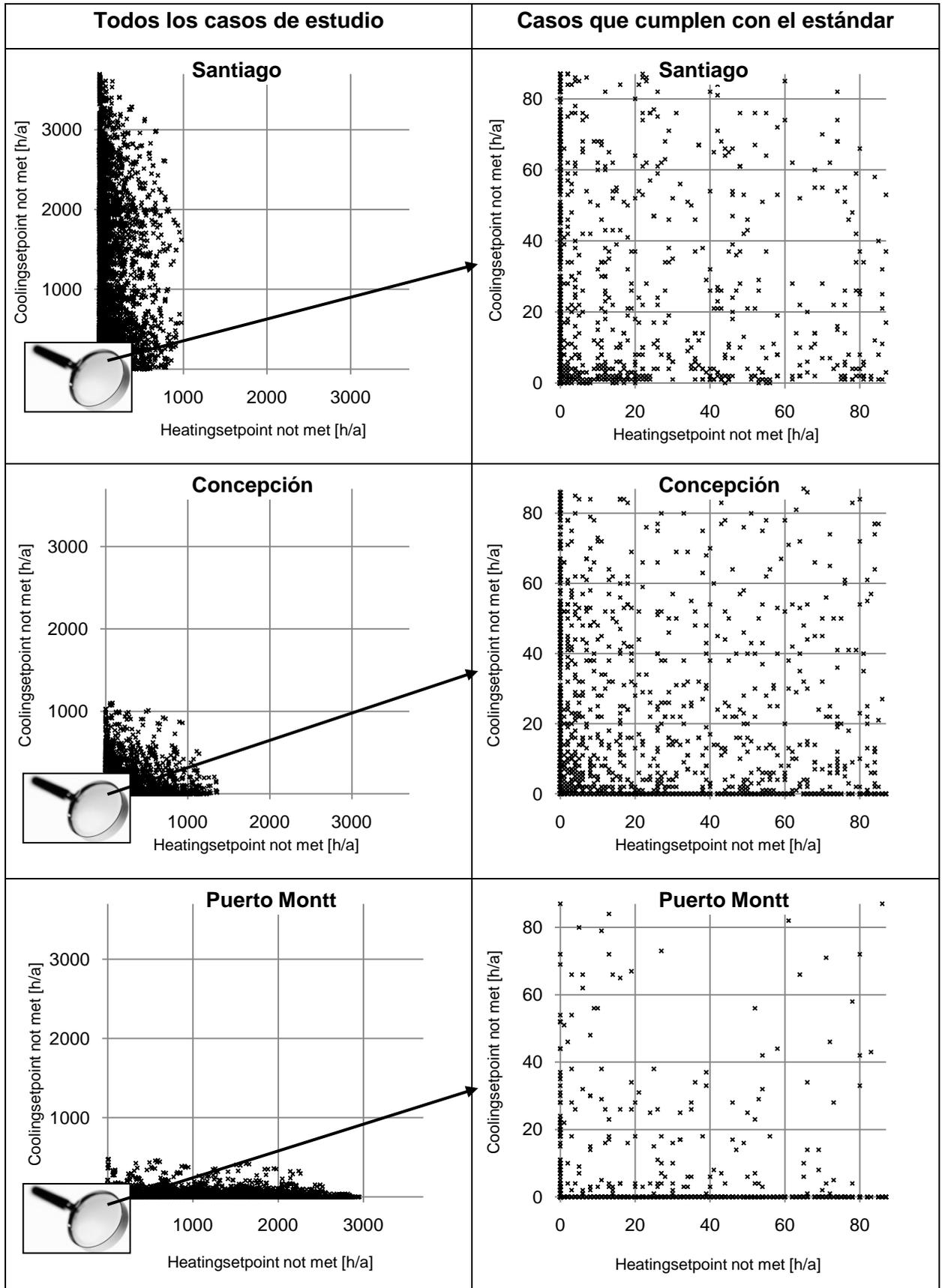


Ilustración 4-1: Porcentaje de los casos de estudio que cumplieron los criterios del estándar Passivhaus en distintos climas (elaboración propia).

Para el análisis se dividen los 20.736 casos de estudio por las tres ubicaciones climáticas distintas. Por lo tanto, cada ubicación cuenta con 6.912 casos analizados. En la tabla 4-2 se muestra para cada ciudad, un resumen gráfico de estos casos. El eje vertical de los gráficos representa las horas del año donde el sistema de refrigeración no alcanza a la temperatura interior deseada (26° C) y el eje horizontal representa las horas del año donde el sistema de calefacción no alcanza a la temperatura interior deseada (20° C). Los gráficos en el lado izquierdo de la tabla contienen el total de los casos simulados por ciudad, por lo tanto, cada punto representa un caso de estudio. Los gráficos en el lado derecho de la tabla contienen solo los casos que cumplen con el límite del estándar Passivhaus anteriormente descrito.

Tabla 4-2: Resumen de las horas por año heating and cooling setpoint not met en Santiago, Concepción y Puerto Montt y la extracción de los casos Passivhaus (elaboración propia).



En estos gráficos se pueden observar las mismas tendencias que aparecen en la tabla 4-1. En Santiago, los casos de estudio están concentrados más al eje de no lograr ser refrigerados y en Puerto Montt al eje de no lograr ser calefaccionados. En Concepción hay una situación equilibrada con tendencia al lado de calefacción. Las horas del no cumplimiento muestran en Santiago y Puerto Montt una dispersión hasta 3.500 horas del año (4,8 meses) por sus situaciones climáticas mucho más extremas que en Concepción.

Tabla 4-3: Influencia de los parámetros y sus niveles para lograr el estándar Passivhaus. El valor porcentual describe que porcentaje de los casos, que lograron el estándar Passivhaus corresponden a cada nivel de cada parámetro (elaboración propia).

Parámetro	Nivel	Santiago	Concepción	Puerto Montt
Ciudad/ Ubicación				
Orientación	Noroeste (315°)	31%	33%	33%
	Norte (0°)	36%	33%	34%
	Nordeste (45°)	33%	34%	33%
Forma	Compacta	41%	50%	39%
	Irregular	59%	50%	61%
Superficie vidriada este/ oeste	15% del muro	91%	64%	67%
	40% del muro	9%	36%	33%
Superficie vidriada norte	15% del muro	54%	39%	43%
	40% del muro	30%	34%	33%
	70% del muro	16%	27%	24%
Alero norte	Si	59%	52%	49%
	No	41%	48%	51%
Sombra temporal este/ oeste	Si	61%	55%	51%
	No	39%	45%	49%
Tipo de ventanas	U=1,3_g=0,64	63%	63%	76%
	U=2,7_g=0,78	37%	37%	24%
Transmitancia térmica muros	U = 0,2	45%	42%	57%
	U = 0,35	34%	34%	33%
	U = 0,5	21%	24%	11%
Inercia térmica	Baja	32%	39%	36%
	Alta	68%	61%	64%
Recuperación de calor	Si	57%	65%	90%
	No	43%	35%	10%
Intercambiador de calor subsuelo-aire	Si	57%	58%	55%
	No	43%	42%	45%

De los gráficos de heating- and cooling- setpoint not met, se obtiene la información, de que los mismos casos de estudio, muestran un comportamiento distinto en las diferentes ubicaciones climáticas. Para desarrollar una estrategia de diseño, se requiere la influencia de los diferentes parámetros y sus niveles al comportamiento energético, en relación al clima.

La Tabla 4-3 muestra el porcentaje de los casos que lograron el estándar Passivhaus con respecto a cada nivel y a cada parámetro. La suma de los porcentajes, dentro de un parámetro, corresponde al 100% de los casos que lograron el estándar. En Santiago por ejemplo corresponde el 100% a los 1.862 casos que cumplieron el estándar y el 100% de los casos que cumplieron en Santiago alcanzan el 31% con el nivel “orientación” Noroeste (315°), el 36% con el nivel Norte (0°) y el 33% con el nivel Nordeste (45°).

Si los valores porcentuales de distintos niveles de un parámetro son parecidos, significa que variar de nivel en el parámetro no tiene mucha influencia, como por ejemplo el parámetro “orientación” en Concepción. Si hay una diferencia grande entre los porcentajes de los niveles, significa que este parámetro tiene una influencia significativa al cumplir el estándar, como, por ejemplo, el parámetro “recuperación de calor” en Puerto Montt.

Luego, se calcularon las diferencias de los porcentajes de los niveles dentro del parámetro de los casos que lograron el estándar. Se normalizaron los valores de la diferencia más grande que es de un 100%. Por consiguiente este parámetro, el cual tiene 100% de influencia, es el más crítico en lograr el estándar cuando cambia del nivel más favorable al nivel menos favorable.

Las diferencias porcentuales obtenidas se grafican en la ilustración 4-2, donde se puede observar, una vez más, que existen diferencias en la influencia de los parámetros, en las distintas ubicaciones climáticas. En Santiago se observan los parámetros importantes que están relacionados con la protección del sobrecalentamiento en verano, mientras que en las ciudades más al sur, se aumenta la importancia de los parámetros relacionados a calefaccionar los recintos. Además, se muestra que en Santiago y Puerto Montt, hay sólo algunos parámetros que tienen una influencia mayor, mientras que en Concepción estos parámetros son numerosos. A continuación una descripción detallada para cada ciudad estudiada, en forma individual.

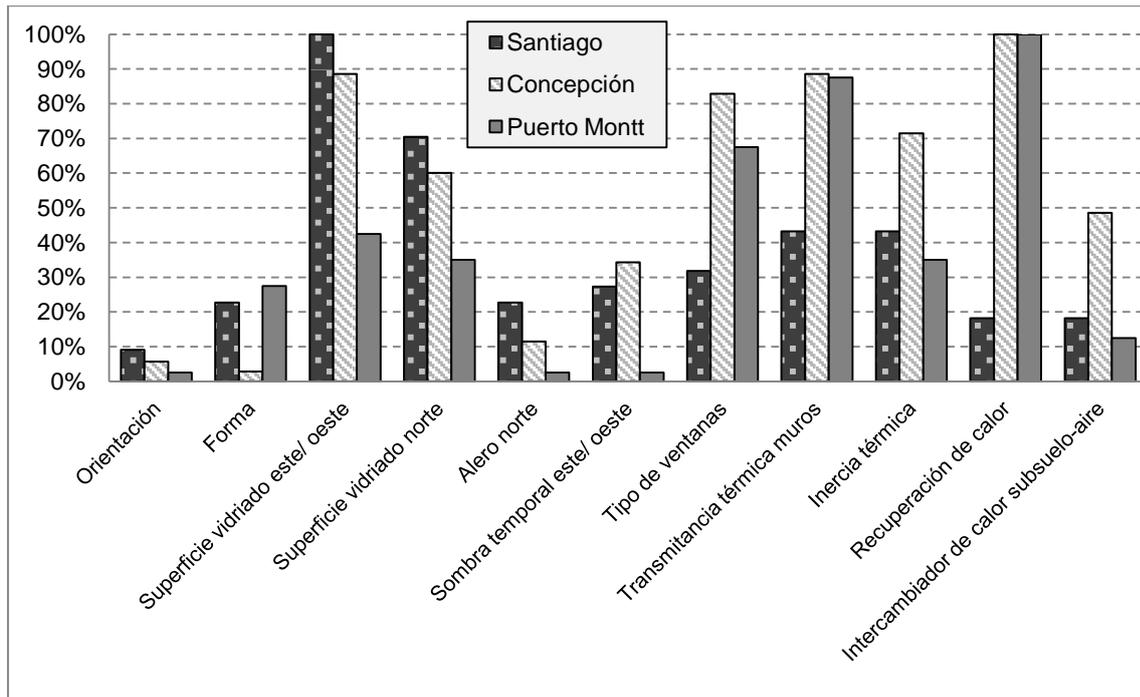


Ilustración 4-2: Porcentaje de la influencia del cambio de niveles de los distintos parámetros estudiados, para lograr el estándar Passivhaus en tres diferentes climas: Santiago, Concepción, Puerto Montt (elaboración propia).

4.1.3 Influencia de los parámetros y sus niveles de clasificación en Santiago

Para analizar el impacto de la variación de cada parámetro del estudio, los casos se dividieron por ciudades y se ordenaron los parámetros de manera ascendiente desde el parámetro con menor influencia hasta el parámetro con mayor influencia. El parámetro con la influencia más significativa se normalizó en el 100%. Este tipo de gráfico se clasifica según grado de importancia, pero no indica que nivel del parámetro es el más favorable. La información sobre los niveles favorables y desfavorables de los parámetros se obtiene de la tabla 4-3.

En la siguiente ilustración 4-3, se graficó la influencia de los parámetros para Santiago ordenados por su importancia. Se puede observar, que los dos parámetros más significativos son las superficies vidriadas al este/oeste y al norte. Los otros parámetros tienen un impacto bastante menos significativo en lograr el estándar Passivhaus que los dos primeros. Como información para el diseño, se puede inferir del gráfico, que las superficies vidriadas tienen una influencia importante en Santiago. La ilustración no menciona qué nivel del parámetro es el más favorable en lograr el estándar. Esta información se puede obtener de la tabla 4-3. Según el gráfico, el parámetro superficie vidriada este/oeste es el más significativo en Santiago y según la tabla cumplieron con el 91% de los casos del estándar, los cuales tienen una superficie vidriada al este/oeste del 15% de los muros. Esto

significa, que el diseño de una casa, que cumple con el estándar en Santiago, generalmente no debe tener ventanas grandes al este y oeste.

Por otra parte, el parámetro con la influencia más baja, es la orientación. Esto significa que, para cumplir el estándar, no es necesario, que la orientación de la fachada principal se ubique 100% al norte. Se puede girar la casa desde el noroeste hasta el noreste sin tener una diferencia importante para cumplir con el estándar.

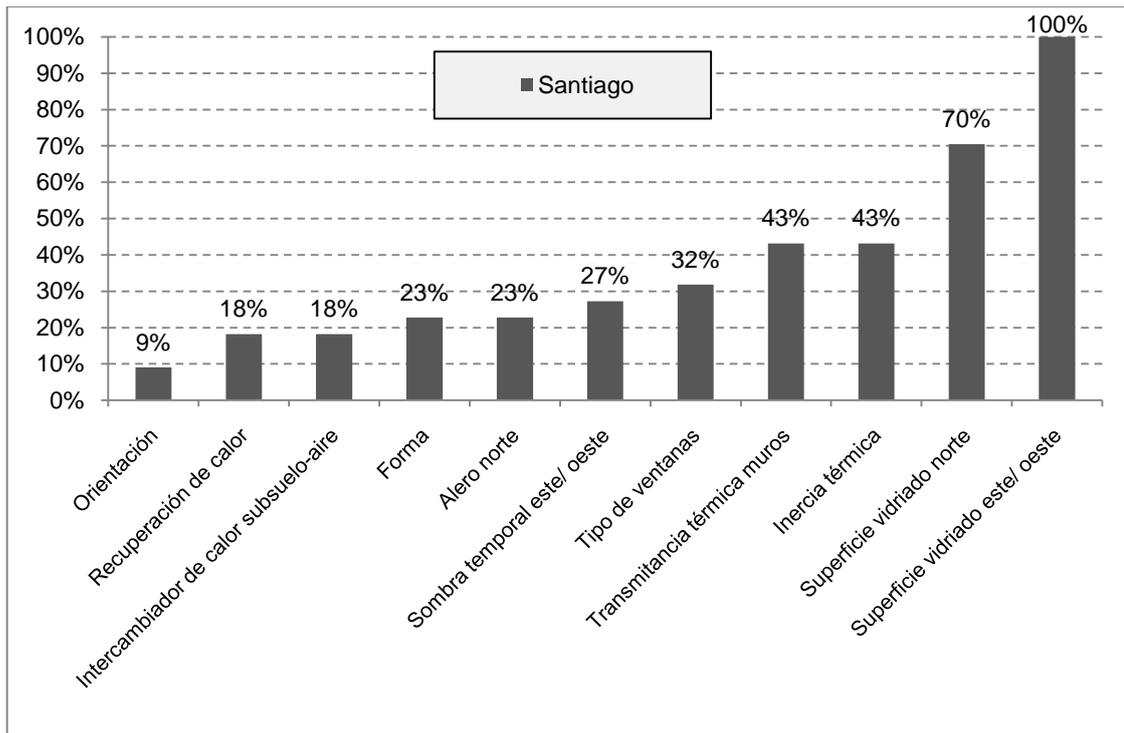


Ilustración 4-3: Porcentaje de la influencia del cambio del nivel de los distintos parámetros estudiados para lograr el estándar Passivhaus en Santiago, ordenado del parámetro menos importante al más importante (elaboración propia).

4.1.4 Influencia de los parámetros y sus niveles de clasificación en Concepción

El análisis de la importancia de los parámetros en Concepción entrega otro orden, en comparación a Santiago. Este orden se graficó en la ilustración 4-4. Los parámetros que son fuertemente relacionados con el desempeño energético en invierno, son los más influyentes en cumplir el estándar en Concepción. Estos son, en general, un sistema de ventilación con recuperación de calor, una baja transmitancia térmica de la envolvente y ventanas de una calidad térmica mejorada. En comparación a Santiago y Puerto Montt, no existe un parámetro fuertemente dominante. Los cuatro parámetros más importantes fluctúan entre el 80% y el 100% de influencia. Esto significa, que si el diseño no cuenta con un sistema de ventila-

ción con recuperación de calor (el parámetro más influyente) igualmente se puede cumplir el estándar, si todos los otros parámetros poseen sus niveles en óptimas condiciones.

Al igual que en Santiago, el parámetro orientación no tiene una influencia significativa en cumplir el estándar, al igual que el parámetro de la forma.

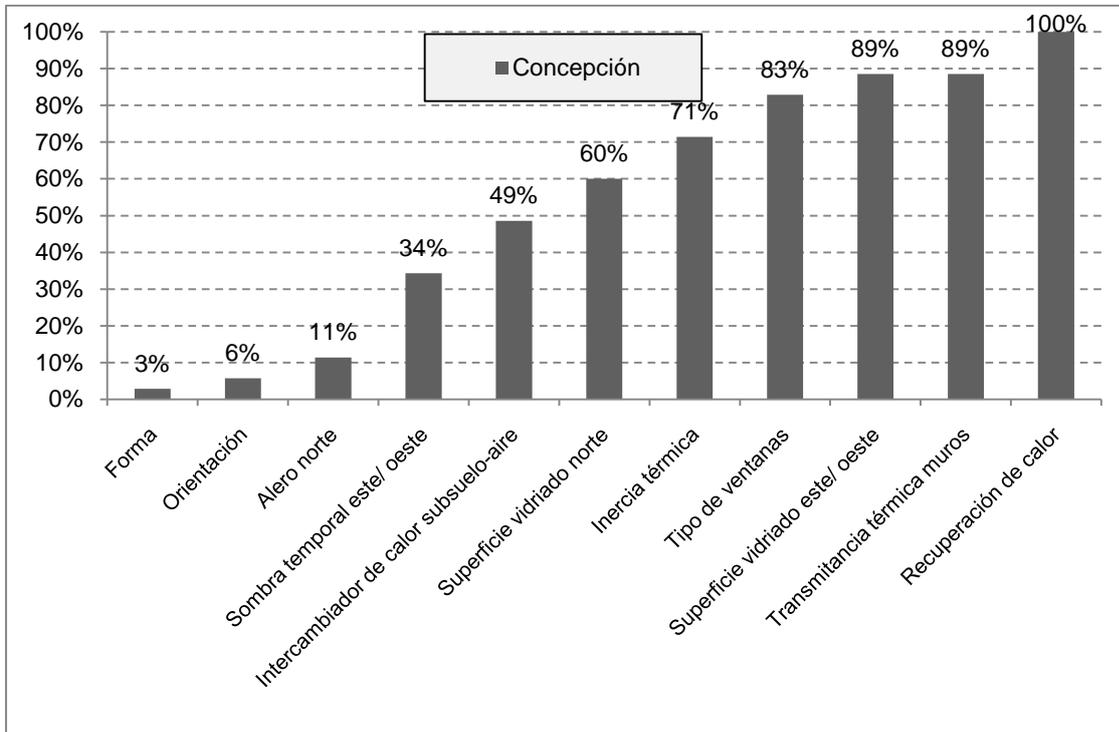


Ilustración 4-4: Porcentaje de la influencia del cambio del nivel de los distintos parámetros estudiados para lograr el estándar Passivhaus en Concepción, ordenado del parámetro menos importante al más importante (elaboración propia).

4.1.5 Influencia de los parámetros y sus niveles a la clasificación en Puerto Montt

Al igual que en Santiago, en Puerto Montt existen parámetros dominantes. Estos son, de acuerdo a su influencia, un sistema con recuperación de calor, una baja transmitancia térmica de la envolvente y ventanas de una calidad térmica alta. En la tabla 4-4 se puede observar, que el 90% de los casos cumplen con el estándar en Puerto Montt, ya que, cuentan con un sistema de ventilación que tiene incorporado un intercambiador de calor. Por lo tanto, si un diseño de una casa en Puerto Montt no cuenta con dicho sistema, existe una posibilidad mínima, de un 10%, que la casa logre el estándar Passivhaus.

El parámetro “orientación” no tiene mayor influencia al cumplir con el estándar en Puerto Montt, al igual que en Santiago y Concepción, entendiendo que, el parámetro orientación considera una rotación de la fachada principal entre el noroeste hasta el noreste. La ventaja de la baja influencia de este parámetro es, que se puede adaptar un diseño de una mejor forma al sitio, dado que no requiere siempre tener la orientación de 100% al norte.

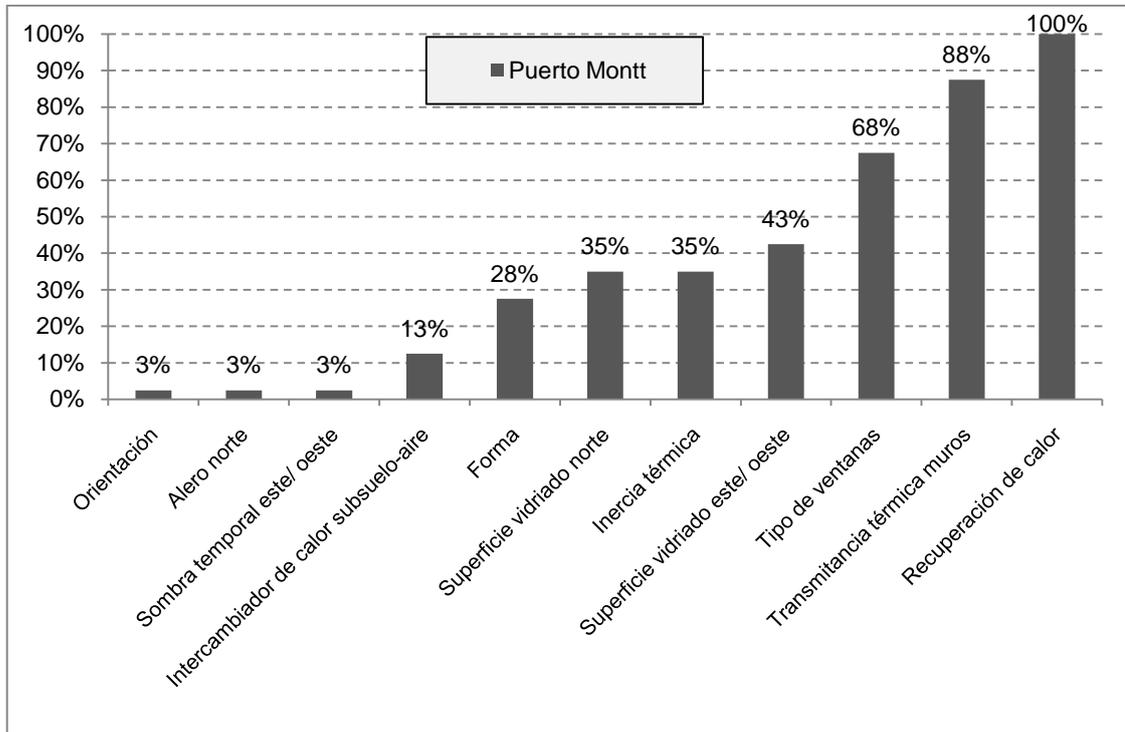


Ilustración 4-5: Porcentaje de la influencia del cambio del nivel de los distintos parámetros estudiados para lograr el estándar Passivhaus en Puerto Montt, ordenado del parámetro menos importante al más importante (elaboración propia).

4.2 Análisis de la demanda energética de todos los casos de estudio

4.2.1 Análisis global de la demanda energética de todos los casos de estudio y comparación entre las tres ciudades analizadas

En el punto 4.1 se clasificaron los casos en aquellos que cumplen con el estándar Passivhaus y en aquellos casos que no cumplen con el estándar. Además, se dio a conocer qué parámetros tienen mayor influencia para esta clasificación.

En el presente subcapítulo, se analiza la demanda energética de los casos de estudio. Se utiliza como variable de respuesta la demanda energética, la cual se obtiene de los resultados de las simulaciones térmicas dinámicas. A través de las simulaciones, se analiza el comportamiento térmico de los casos de estudio cada 15 minutos durante un año tipo. El

resultado de las simulaciones es la suma de la demanda energética en refrigeración y calefacción durante el año tipo. 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. El consumo, los gastos respectivos y la rentabilidad del estándar se analizan en los capítulos 5 y 6.

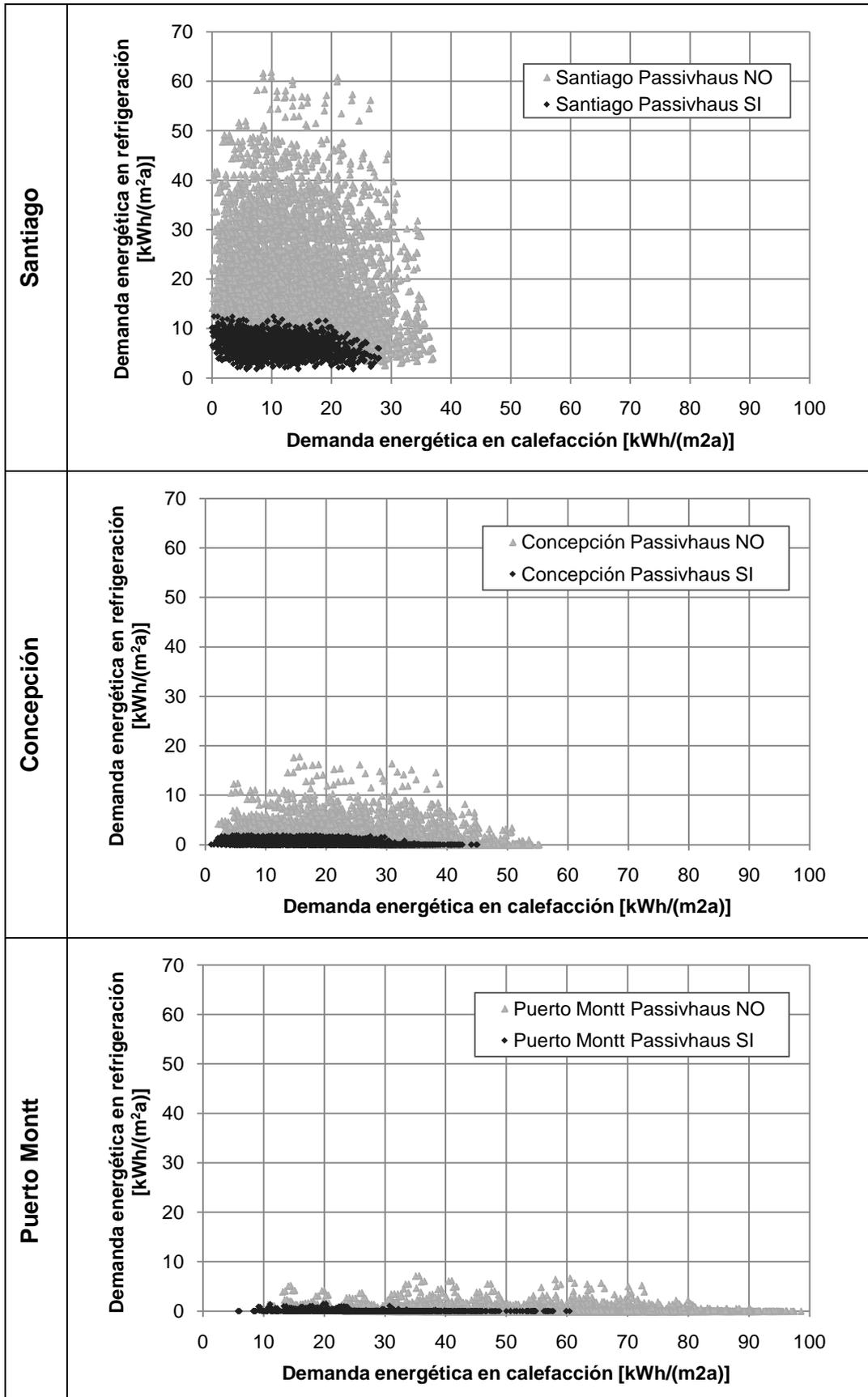
La demanda energética se expresa generalmente, como la demanda por m^2 y por año en $kWh/(m^2a)$. Los m^2 comprende la superficie útil climatizada de la vivienda, obtenida con las medidas interiores. Se utilizan los términos descritos en la tabla 4-4 para el análisis.

Tabla 4-4: Términos para el análisis de la demanda energética (elaboración propia)

Término	Unidad	Definición
Demanda en refrigeración	$[kWh/(m^2a)]$	Demanda en energía para refrigeración
Demanda en calefacción	$[kWh/(m^2a)]$	Demanda en energía para calefacción
Demanda energética total	$[kWh/(m^2a)]$	Suma de la demanda energética en calefacción y refrigeración

Se grafican, en la tabla 4-5, las demandas energéticas separadas por ciudades estudiadas. El primer gráfico es de Santiago, el segundo de Concepción y el tercero de Puerto Montt. Los ejes verticales muestran la demanda energética en verano para refrigeración y los ejes horizontales la demanda energética para calefacción en invierno. Cada punto en el gráfico representa un caso de estudio analizado, por lo tanto, cada gráfico cuenta con 6.912 puntos, que corresponden respectivamente a los casos. Dentro de cada gráfico se dividen los casos en casos que cumplen el estándar Passivhaus y casos que no cumplen, según subcapítulos anteriores. Los casos que cumplen son representados con el color negro.

Tabla 4-5: Demanda energética en calefacción y refrigeración separada en casos que cumplieron y no cumplieron el estándar Passivhaus en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).



Se puede observar que la distribución de los puntos es diferente con respecto a la ubicación geográfica de la ciudad estudiada, similar a la situación obtenida de la clasificación del estándar. En Santiago se observa que la dispersión tiene una tendencia fuerte hacia la demanda en refrigeración mientras que la tendencia en Concepción y más fuerte todavía en Puerto Montt apunta claramente hacia la calefacción.

Los gráficos muestran que los casos de estudio, en general, tienen un buen comportamiento térmico. Posteriormente en el subcapítulo 4.3 se realiza una comparación de los casos de estudio con los casos de referencia, según la reglamentación térmica.

Además se puede observar, que los casos que cumplieron con el estándar Passivhaus, tienen una demanda energética más baja que los casos que no cumplieron. En Concepción y con menor intensidad en Santiago y Puerto Montt, lograron en algunos casos una demanda energética en calefacción y refrigeración cerca de cero, por lo tanto, no requieren de un sistema de climatización para lograr un confort interior alto durante todo el año. Estos casos se analizan, con más profundidad, en el subcapítulo 4.4.

En la tabla 4-6, se resumen estadísticamente los resultados de los gráficos ilustrados en la tabla 4-5. La columna izquierda contiene el resumen de todos los casos de estudio y la columna derecha el resumen de los casos que lograron el estándar Passivhaus. La primera línea muestra la demanda energética total, la cual es la suma de la demanda de refrigeración y de calefacción. La segunda línea muestra la demanda energética en refrigeración y la tercera fila, la demanda energética en calefacción. Cada gráfico contiene información sobre el comportamiento energético de los casos de estudio, por separado para Santiago, Concepción y Puerto Montt¹.

¹ Los gráficos son de la forma box-plot o diagrama de caja, que muestra una medida de centralidad (Mediana), una medida de dispersión (Rango intercuartilico RIC), y la presencia de posibles outlier. El diagrama de caja básicamente muestra los 5 números de resumen (Mínimo, Cuartil1(Q1), Cuartil2 (Q2), Cuartil3(Q3) y Máximo). En su construcción los bigotes (Whisker) se construyen como $Q1 - 1.5RIC$ y $Q3 + 1.5RIC$, donde $RIC = Q3 - Q2$. Los valores mínimos y máximos se grafico como punto en el extremo. Los bigotes son las barras de error y la caja es definido por los cuartiles 1 y 3. La línea dentro de la caja es la mediana y la cruz el valor promedio.

Tabla 4-6: Demanda energética de todos los casos de estudio versus los casos que cumplen con el estándar Passivhaus en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).

Demanda energética de todos los casos de estudio en Santiago, Concepción y Puerto Montt	Demanda energética de los casos que cumplen con el estándar Passivhaus en Santiago, Concepción y Puerto Montt
<p style="text-align: center;"><i>Demanda energética total</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>Demanda energética total</i></p>
<p style="text-align: center;"><i>Demanda energética en refrigeración</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>Demanda energética en refrigeración</i></p>
<p style="text-align: center;"><i>Demanda energética en calefacción</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>Demanda energética en calefacción</i></p>

La comparación entre todos los casos versus las casas Passivhaus muestra, que los casos que lograron el estándar tienen una demanda energética significativamente más baja que los casos que no lograron el estándar, por lo tanto, este comportamiento es válido tanto para la calefacción como para la refrigeración. Además se puede observar que la dispersión de los datos de todos los casos es más amplia que la de los casos Passivhaus.

Analizando los gráficos de la demanda en calefacción en la tabla 4-6, se puede observar que la demanda en Santiago es aproximadamente un tercio de la demanda en Puerto Montt. Esto significa que una casa con propiedades térmicas determinadas tendrá en Puerto Montt una demanda en calefacción tres veces mayor que en Santiago. Entre Santiago y Concepción no hay una diferencia tan notable.

En los gráficos de la demanda energética para refrigeración en la tabla 4-6, se observa que en Concepción y Puerto Montt se manifiestan sólo algunos casos extremos de demanda energética en refrigeración. En estas dos ciudades por lo tanto, la demanda de energía total depende casi al 100% de la demanda energética en calefacción.

La demanda energética total de los casos que cumplieron el estándar Passivhaus no tiene una dispersión alta entre las tres ciudades estudiadas. Se percibe claramente, que en Puerto Montt, dado su clima más severo, hay una demanda energética más alta que en Santiago o en Concepción, pero en comparación con la demanda de todos los casos de estudio, esta dispersión es menor.

Según la dispersión de los datos, se concluye que la influencia entre los cambios de los distintos niveles de un parámetro, es más significativo en la demanda energética, que los cambios de los niveles en otros parámetros. Para la obtención de un diseño energéticamente mejorado, es de alto interés, saber cuáles de los parámetros influyen más en la demanda y en cuanto. Especialmente si se quiere lograr un estándar energético tan exigente como el estándar Passivhaus, hay que conocer con cuales de los parámetros se puede bajar, al máximo, la demanda.

En la tabla 4-7 aparecen, los valores promedio de la demanda energética total (refrigeración + calefacción) separado por ciudades, con los diferentes parámetros y sus niveles. Se puede observar, que por un lado, hay parámetros donde se observan cambios no significativos de un nivel a otro en la demanda energética. Por otro lado, existen parámetros donde un cambio del nivel produce un cambio bastante significativo en la demanda energética.

Tabla 4-7: Influencia de los parámetros y sus niveles en la demanda energética total (suma calefacción y refrigeración) de todos los casos de estudio independiente que cumplen con el estándar Passivhaus o no (elaboración propia).

Parámetro	Nivel	Demanda energética total (promedio)		
		[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]
Ciudad/ Ubicación		Santiago	Concepción	Puerto Montt
Orientación	Noroeste (315°)	29,8	24,7	48,5
	Norte (0°)	28,8	24,2	47,9
	Nordeste (45°)	29,7	24,7	48,7
Forma	Compacta	29,9	21,5	43,1
	Irregular	29,0	27,5	53,6
Superficie vidriada este/ oeste	15% del muro	23,7	24,0	47,5
	40% del muro	35,2	25,1	49,3
Superficie vidriada norte	15% del muro	26,2	25,8	50,2
	40% del muro	28,7	24,0	47,9
	70% del muro	33,4	23,7	47,1
Alero norte	Si	28,2	26,3	51,5
	No	30,7	22,8	45,3
Sombra temporal este/ oeste	Si	25,2	24,2	49,3
	No	33,7	24,8	47,4
Tipo de ventanas	U=1,3_g=0,64	25,0	20,4	40,5
	U=2,7_g=0,78	33,9	28,7	56,3
Transmitancia térmica muros	U = 0,2	25,6	19,4	39,1
	U = 0,35	29,1	24,4	48,1
	U = 0,5	33,6	29,8	57,9
Inercia térmica	Baja	26,5	23,4	48,2
	Alta	32,4	25,7	48,5
Recuperación de calor	Si	24,9	16,6	34,5
	No	34,0	32,4	62,3
Intercambiador de calor subsuelo-aire	Si	27,0	22,8	47,9
	No	31,8	26,2	48,8

Analizando la tabla 4-7, se observa claramente, que por los parámetros y sus niveles definidos, la demanda energética total, tiene los valores promedio más bajos en Concepción, con 24,5 kWh/(m²a) debido a la situación climática menos severa. En Santiago con 29,4 kWh/(m²a) y Puerto Montt con 48,4 kWh/(m²a) los valores promedios son más elevados por sus climas más extremos. En Santiago aumenta la demanda energética de refrigeración en verano y en Puerto Montt aumenta la demanda energética en calefacción en invierno. Estos valores promedios dependen de los parámetros y sus rangos definidos.

El hecho más interesante a partir de los resultados de la tabla 4-7, es la diferencia en la demanda energética entre los niveles de un mismo parámetro. Por ejemplo: ¿En cuánto cambia la demanda energética en Puerto Montt si posee un sistema de ventilación con recuperación de calor o bien si no cuenta con recuperación de calor? El resultado es una diferencia de 27,8 kWh/(m²a). Si se calcula la diferencia de la demanda energética para cada parámetro, entre su nivel máximo y mínimo, se pueden comparar los resultados, para obtener la influencia de los parámetros y la magnitud de la influencia en el consumo energético.

La diferencia entre el nivel más favorable y el nivel menos favorable de todos los parámetros analizados, se graficó en la ilustración 4-6, separados por ciudades estudiadas. Se puede observar que, similar a la clasificación entre el cumplimiento con el estándar Passivhaus y no cumplimiento, hay algunos parámetros que son más importantes que otros. El rango de la importancia de los parámetros cambia entre las ciudades estudiadas dado que el comportamiento térmico de los casos de estudio depende de la situación climática.

En general, los parámetros relacionados con la demanda energética en refrigeración, como superficies vidriadas, sombras o inercia térmica, en la ciudad de Santiago poseen una importancia más alta. En las ciudades más al sur la importancia de los parámetros relacionados a la demanda energética en calefacción, tales como recuperación de calor, transmitancia térmica y tipos de ventanas, aumenta. Aunque se puede observar que también en Santiago se reduce la demanda energética considerablemente, incorporando un sistema de ventilación con recuperación de calor.

Aunque las diferencias en la demanda energética no tienen valores absolutos muy elevados, hay que considerar el nivel energético que se quiere lograr con el estándar Passivhaus. Como se puede observar en la tabla 4-6, los casos que cumplieron con el estándar Passivhaus, tienen una demanda energética alrededor de 20 kWh/(m²a), por lo tanto, es una diferencia significativamente alta de 27,8 kWh/(m²a) entre un nivel y otro, como ocurre en el caso de la recuperación de calor. Esto significa, que el hecho de no tener un sistema de ventilación con recuperación de calor en Puerto Montt, disminuye la posibilidad de lograr el estándar Pas-

sivhaus drásticamente. En conclusión, hay que buscar la combinación de los parámetros y sus niveles óptimos, para lograr un estándar energético superior.

De la ilustración 4-6, se pueden extraer los parámetros con mayor influencia y de la tabla 4-6 se puede elegir el nivel más favorable del mismo parámetro para lograr una demanda energética baja. El parámetro “orientación” no tiene una influencia significativa para la demanda energética en ninguna de las ciudades estudiadas. Esto significa que no es necesario, para obtener una demanda energética baja, que la orientación de la fachada principal se ubique 100% al norte. Se puede girar la casa desde el noroeste hasta el noreste sin tener una diferencia importante en la demanda energética.

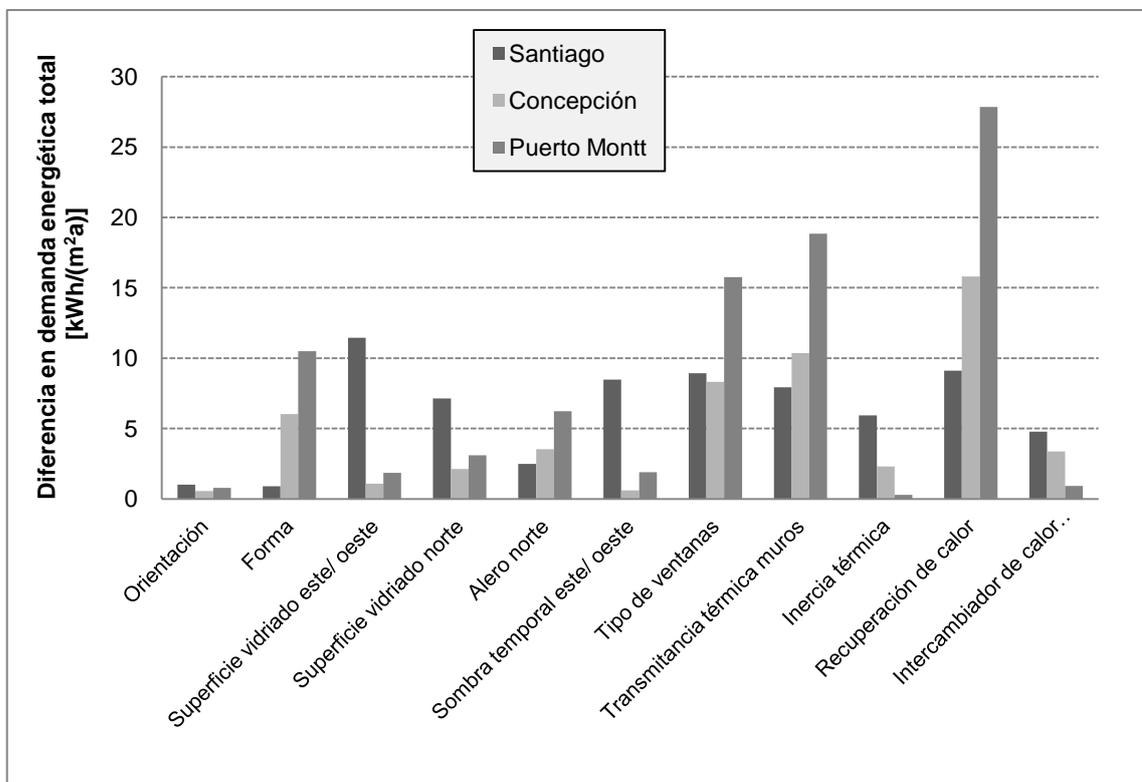


Ilustración 4-6: Influencia de los parámetros investigados en la diferencia de la demanda energética total (refrigeración + calefacción) en tres climas diferentes: Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).

Para analizar los parámetros y su rango de importancia para cada ciudad, a continuación se dividen los datos por ciudades y se realizó un estudio específico para cada ciudad. Además se analiza, por separado, la demanda energética total, la demanda energética para refrigeración y la demanda energética para calefacción.

4.2.2 Análisis de la demanda energética de todos los casos de estudio para Santiago

Anteriormente se analizó la demanda energética total de todos los casos de estudio y se realizó una comparación entre las ciudades. Más adelante se estudian las ciudades por separadas y se divide la demanda energética total de la demanda energética para refrigeración y la demanda energética para calefacción.

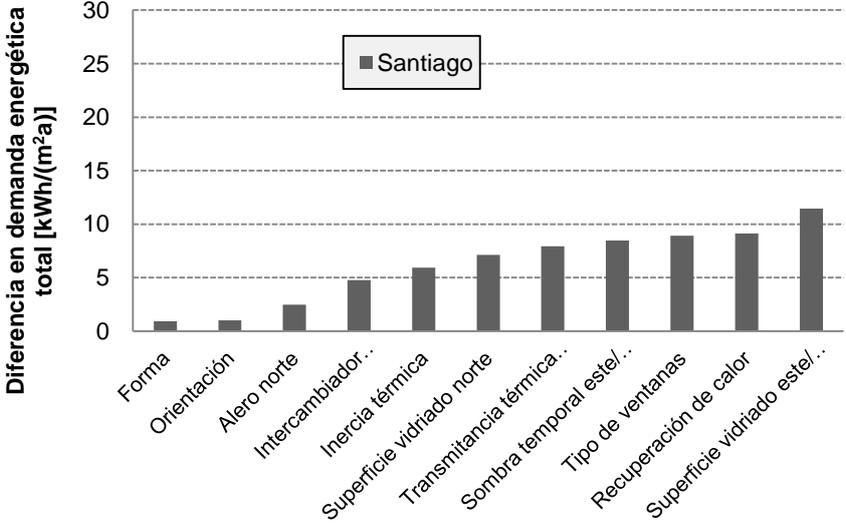
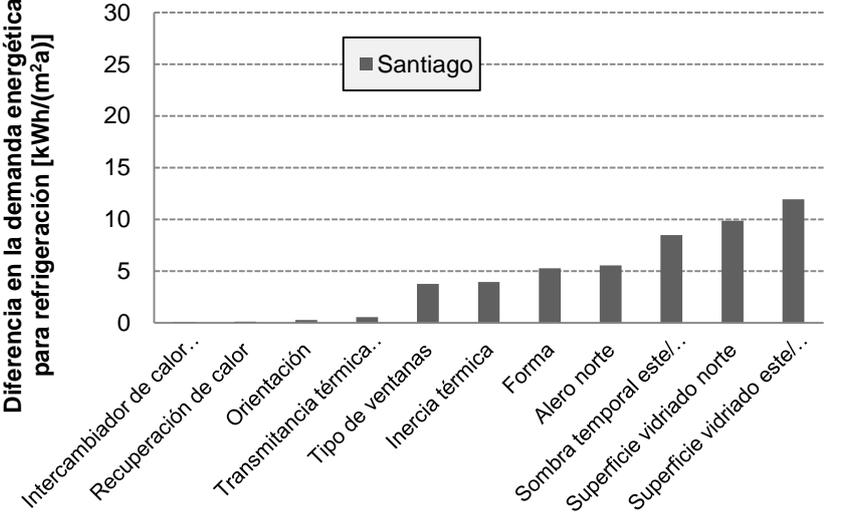
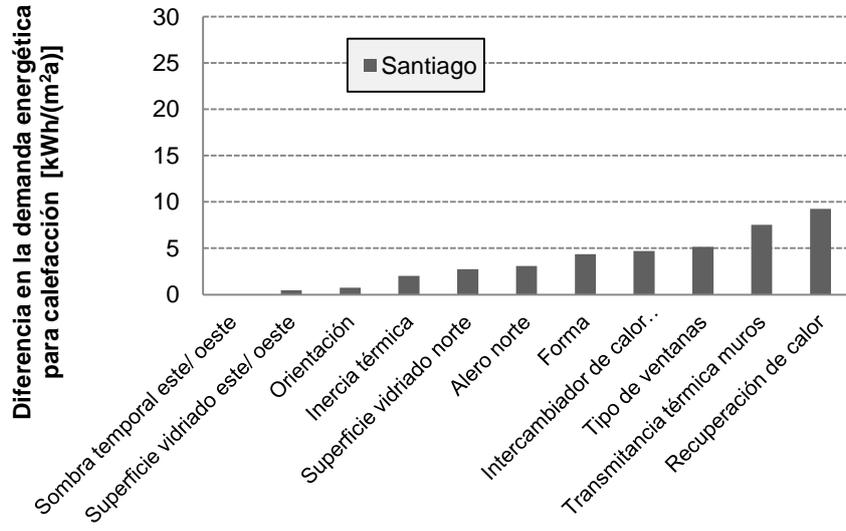
En el caso de la ciudad de Santiago se observa, en la tabla 4-8, que existe una demanda promedio importante en la energía para refrigeración. Esta demanda supera la demanda energética para calefacción. La desviación estándar de 12,5 kWh/(m²a) muestra que la dispersión de los resultados no es muy amplia, aunque existen algunos casos especiales que reflejan los máximos y mínimos.

Tabla 4-8: Resumen de la demanda energética de todos los casos de estudio en Santiago. La tabla muestra los valores: cantidad, media, varianza, desviación estándar, máximo y mínimo para la demanda energética total, de refrigeración y de calefacción (elaboración propia).

	Cantidad de casos	Promedio	Varianza	Desviación Estándar	Máximo	Mínimo
	Nº	kWh/(m ² a)				
Demanda energética total	6.912	29,4	156,4	12,5	82,7	5,0
Demanda energética para refrigeración	6.912	16,2	111,7	10,6	61,9	1,8
Demanda energética para calefacción	6.912	13,2	59,0	7,7	36,9	0,0

La tabla 4-9 muestra un resumen gráfico de la influencia de los diferentes parámetros en sus distintos niveles. El primer gráfico muestra la influencia en la demanda energética total, el segundo, la influencia en la demanda para refrigeración y el tercer gráfico, la influencia para la demanda energética en calefacción. Se puede observar, que el parámetro más significativo es el porcentaje de la superficie vidriada al este/oeste y en segundo lugar, un sistema de ventilación con recuperación de calor. Estos dos parámetros 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 para calefacción.

Tabla 4-9: Influencia de los parámetros investigados en la diferencia de la demanda energética en Santiago, separado por demanda energética total, de refrigeración y de calefacción (elaboración propia).

<p>Influencia de los parámetros investigados en la demanda energética total (suma de refrigeración y calefacción) expresado en kWh/(m²a) en Santiago</p>	 <table border="1"> <caption>Diferencia en demanda energética total [kWh/(m²a)]</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Diferencia [kWh/(m²a)]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Forma</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>Orientación</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>Alero norte</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>Intercambiador de calor</td><td>4.5</td></tr> <tr><td>Inercia térmica</td><td>5.5</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado norte</td><td>7.0</td></tr> <tr><td>Transmitancia térmica</td><td>8.0</td></tr> <tr><td>Sombra temporal este</td><td>8.5</td></tr> <tr><td>Tipo de ventanas</td><td>9.0</td></tr> <tr><td>Recuperación de calor</td><td>9.0</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado este</td><td>11.5</td></tr> </tbody> </table>	Parámetro	Diferencia [kWh/(m ² a)]	Forma	1.0	Orientación	1.0	Alero norte	2.5	Intercambiador de calor	4.5	Inercia térmica	5.5	Superficie vidriado norte	7.0	Transmitancia térmica	8.0	Sombra temporal este	8.5	Tipo de ventanas	9.0	Recuperación de calor	9.0	Superficie vidriado este	11.5
Parámetro	Diferencia [kWh/(m ² a)]																								
Forma	1.0																								
Orientación	1.0																								
Alero norte	2.5																								
Intercambiador de calor	4.5																								
Inercia térmica	5.5																								
Superficie vidriado norte	7.0																								
Transmitancia térmica	8.0																								
Sombra temporal este	8.5																								
Tipo de ventanas	9.0																								
Recuperación de calor	9.0																								
Superficie vidriado este	11.5																								
<p>Influencia de los parámetros investigados en la demanda energética para refrigeración expresado en kWh/(m²a) en Santiago</p>	 <table border="1"> <caption>Diferencia en la demanda energética para refrigeración [kWh/(m²a)]</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Diferencia [kWh/(m²a)]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Intercambiador de calor</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Recuperación de calor</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Orientación</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Transmitancia térmica</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>Tipo de ventanas</td><td>4.0</td></tr> <tr><td>Inercia térmica</td><td>4.0</td></tr> <tr><td>Forma</td><td>5.5</td></tr> <tr><td>Alero norte</td><td>5.5</td></tr> <tr><td>Sombra temporal este</td><td>8.5</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado norte</td><td>10.0</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado este</td><td>12.0</td></tr> </tbody> </table>	Parámetro	Diferencia [kWh/(m ² a)]	Intercambiador de calor	0.5	Recuperación de calor	0.5	Orientación	0.5	Transmitancia térmica	1.0	Tipo de ventanas	4.0	Inercia térmica	4.0	Forma	5.5	Alero norte	5.5	Sombra temporal este	8.5	Superficie vidriado norte	10.0	Superficie vidriado este	12.0
Parámetro	Diferencia [kWh/(m ² a)]																								
Intercambiador de calor	0.5																								
Recuperación de calor	0.5																								
Orientación	0.5																								
Transmitancia térmica	1.0																								
Tipo de ventanas	4.0																								
Inercia térmica	4.0																								
Forma	5.5																								
Alero norte	5.5																								
Sombra temporal este	8.5																								
Superficie vidriado norte	10.0																								
Superficie vidriado este	12.0																								
<p>Influencia de los parámetros investigados en la demanda energética para calefacción expresado en kWh/(m²a) en Santiago</p>	 <table border="1"> <caption>Diferencia en la demanda energética para calefacción [kWh/(m²a)]</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Diferencia [kWh/(m²a)]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Sombra temporal este</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado este</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Orientación</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>Inercia térmica</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado norte</td><td>3.0</td></tr> <tr><td>Alero norte</td><td>3.0</td></tr> <tr><td>Forma</td><td>4.5</td></tr> <tr><td>Intercambiador de calor</td><td>5.0</td></tr> <tr><td>Tipo de ventanas</td><td>5.0</td></tr> <tr><td>Transmitancia térmica</td><td>5.0</td></tr> <tr><td>Recuperación de calor</td><td>9.5</td></tr> </tbody> </table>	Parámetro	Diferencia [kWh/(m ² a)]	Sombra temporal este	0.5	Superficie vidriado este	0.5	Orientación	1.0	Inercia térmica	2.0	Superficie vidriado norte	3.0	Alero norte	3.0	Forma	4.5	Intercambiador de calor	5.0	Tipo de ventanas	5.0	Transmitancia térmica	5.0	Recuperación de calor	9.5
Parámetro	Diferencia [kWh/(m ² a)]																								
Sombra temporal este	0.5																								
Superficie vidriado este	0.5																								
Orientación	1.0																								
Inercia térmica	2.0																								
Superficie vidriado norte	3.0																								
Alero norte	3.0																								
Forma	4.5																								
Intercambiador de calor	5.0																								
Tipo de ventanas	5.0																								
Transmitancia térmica	5.0																								
Recuperación de calor	9.5																								

Por otra parte, se puede observar en la tabla 4-9, que hay parámetros que tienen influencia en ambas demandas, la de refrigeración y la de calefacción. Por ejemplo, la Forma es el parámetro 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, para el resultado del balance energético total, durante el año, la forma de la casa no tiene mucha importancia. La misma situación ocurre con el porcentaje de la superficie vidriada al norte y con el alero norte.

La tercera posibilidad es, que un parámetro tiene, en su 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 presenta 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, 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.

Los valores promedios, varianza, desviación estándar, mínimo y máximo por parámetro y nivel para la demanda energética en refrigeración y calefacción en Santiago aparecen en el Anexo B.

4.2.3 Análisis de la demanda energética de todos los casos de estudio para Concepción

Analizando las demandas de refrigeración y de calefacción por separado, se puede observar en Concepción, que la demanda de la energía total depende, generalmente, sólo de la demanda en calefacción. En el resumen de las demandas de la tabla 4-11, se observa una demanda energética en calefacción de 23,5 kWh/(m²a) lo que muestra un aumento, en comparación a Santiago, de más de 10 kWh/(m²a). Por otra parte, en la suma de las demandas en refrigeración y calefacción, los casos de estudio en Santiago obtienen un valor más alto en comparación a Concepción, a causa de la demanda energética en refrigeración.

En la tabla 4-10, se graficó el resumen de la influencia de los parámetros y sus niveles de la demanda energética total, en refrigeración y en calefacción. Se puede observar, sin embargo, que todos los parámetros, 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, valores U bajos y en tercer lugar, ventanas termo paneles mejoradas. El valor absoluto de la diferencia del parámetro más significativo, es en Concepción más elevado que en Santiago, lo que presenta una mayor importancia de este parámetro.

Tabla 4-10: Influencia de los parámetros investigados en la diferencia de la demanda energética en Concepción separado por demanda energética total, de refrigeración y de calefacción (elaboración propia).

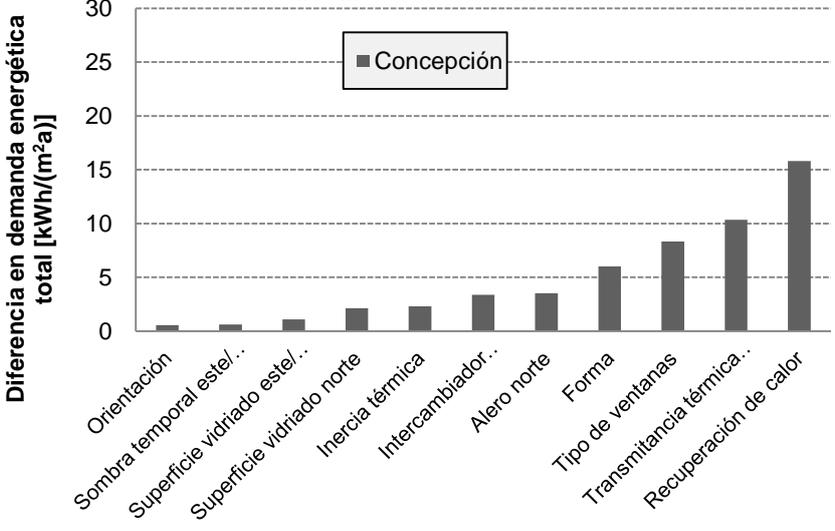
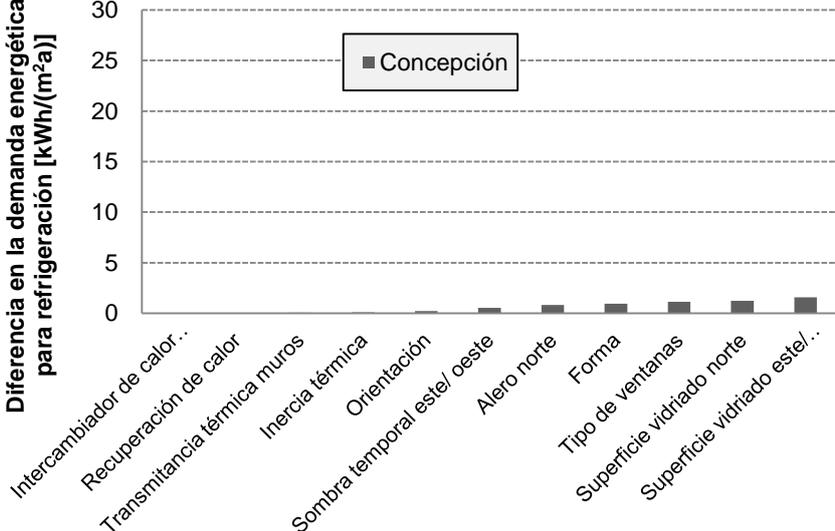
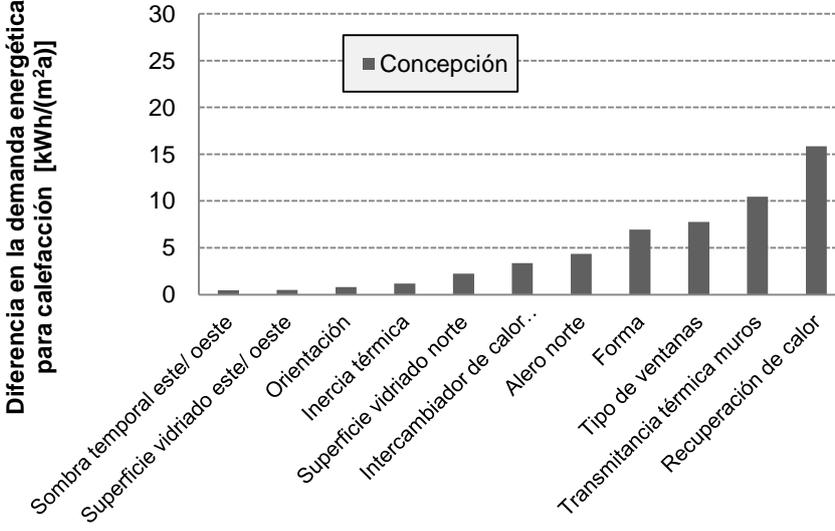
<p>Influencia de los parámetros investigados a la demanda energética en total (suma de refrigeración y calefacción) expresado en kWh/(m²a) en Concepción</p>	 <table border="1"> <caption>Diferencia en demanda energética total [kWh/(m²a)]</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Diferencia [kWh/(m²a)]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Orientación</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Sombra temporal este/...</td><td>0.8</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado este/...</td><td>1.2</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado norte</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>Inercia térmica</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>Intercambiador de calor</td><td>3.5</td></tr> <tr><td>Alero norte</td><td>3.8</td></tr> <tr><td>Forma</td><td>6.0</td></tr> <tr><td>Tipo de ventanas</td><td>8.5</td></tr> <tr><td>Transmisancia térmica...</td><td>10.5</td></tr> <tr><td>Recuperación de calor</td><td>16.0</td></tr> </tbody> </table>	Parámetro	Diferencia [kWh/(m ² a)]	Orientación	0.5	Sombra temporal este/...	0.8	Superficie vidriado este/...	1.2	Superficie vidriado norte	2.0	Inercia térmica	2.5	Intercambiador de calor	3.5	Alero norte	3.8	Forma	6.0	Tipo de ventanas	8.5	Transmisancia térmica...	10.5	Recuperación de calor	16.0
Parámetro	Diferencia [kWh/(m ² a)]																								
Orientación	0.5																								
Sombra temporal este/...	0.8																								
Superficie vidriado este/...	1.2																								
Superficie vidriado norte	2.0																								
Inercia térmica	2.5																								
Intercambiador de calor	3.5																								
Alero norte	3.8																								
Forma	6.0																								
Tipo de ventanas	8.5																								
Transmisancia térmica...	10.5																								
Recuperación de calor	16.0																								
<p>Influencia de los parámetros investigados a la demanda energética para refrigeración expresado en kWh/(m²a) en Concepción</p>	 <table border="1"> <caption>Diferencia en la demanda energética para refrigeración [kWh/(m²a)]</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Diferencia [kWh/(m²a)]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Intercambiador de calor...</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Recuperación de calor</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>Transmisancia térmica muros</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>Inercia térmica</td><td>0.4</td></tr> <tr><td>Orientación</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Sombra temporal este/ oeste</td><td>0.6</td></tr> <tr><td>Alero norte</td><td>0.7</td></tr> <tr><td>Forma</td><td>0.8</td></tr> <tr><td>Tipo de ventanas</td><td>0.9</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado norte</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado este/...</td><td>1.5</td></tr> </tbody> </table>	Parámetro	Diferencia [kWh/(m ² a)]	Intercambiador de calor...	0.1	Recuperación de calor	0.2	Transmisancia térmica muros	0.3	Inercia térmica	0.4	Orientación	0.5	Sombra temporal este/ oeste	0.6	Alero norte	0.7	Forma	0.8	Tipo de ventanas	0.9	Superficie vidriado norte	1.0	Superficie vidriado este/...	1.5
Parámetro	Diferencia [kWh/(m ² a)]																								
Intercambiador de calor...	0.1																								
Recuperación de calor	0.2																								
Transmisancia térmica muros	0.3																								
Inercia térmica	0.4																								
Orientación	0.5																								
Sombra temporal este/ oeste	0.6																								
Alero norte	0.7																								
Forma	0.8																								
Tipo de ventanas	0.9																								
Superficie vidriado norte	1.0																								
Superficie vidriado este/...	1.5																								
<p>Influencia de los parámetros investigados a la demanda energética para calefacción expresado en kWh/(m²a) en Concepción</p>	 <table border="1"> <caption>Diferencia en la demanda energética para calefacción [kWh/(m²a)]</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Diferencia [kWh/(m²a)]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Sombra temporal este/ oeste</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado este/ oeste</td><td>0.8</td></tr> <tr><td>Orientación</td><td>1.2</td></tr> <tr><td>Inercia térmica</td><td>1.5</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado norte</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>Intercambiador de calor...</td><td>3.5</td></tr> <tr><td>Alero norte</td><td>4.0</td></tr> <tr><td>Forma</td><td>7.0</td></tr> <tr><td>Tipo de ventanas</td><td>8.0</td></tr> <tr><td>Transmisancia térmica muros</td><td>10.5</td></tr> <tr><td>Recuperación de calor</td><td>16.0</td></tr> </tbody> </table>	Parámetro	Diferencia [kWh/(m ² a)]	Sombra temporal este/ oeste	0.5	Superficie vidriado este/ oeste	0.8	Orientación	1.2	Inercia térmica	1.5	Superficie vidriado norte	2.0	Intercambiador de calor...	3.5	Alero norte	4.0	Forma	7.0	Tipo de ventanas	8.0	Transmisancia térmica muros	10.5	Recuperación de calor	16.0
Parámetro	Diferencia [kWh/(m ² a)]																								
Sombra temporal este/ oeste	0.5																								
Superficie vidriado este/ oeste	0.8																								
Orientación	1.2																								
Inercia térmica	1.5																								
Superficie vidriado norte	2.0																								
Intercambiador de calor...	3.5																								
Alero norte	4.0																								
Forma	7.0																								
Tipo de ventanas	8.0																								
Transmisancia térmica muros	10.5																								
Recuperación de calor	16.0																								

Tabla 4-11: Resumen de la demanda energética de todos los casos de estudio en Concepción. La tabla muestra los valores: cantidad, media, varianza, desviación estándar, máximo y mínimo para la demanda energética total, de refrigeración y de calefacción (elaboración propia).

	Cantidad de casos	Promedio	Varianza	Desviación Estándar	Máximo	Mínimo
	Nº	kWh/(m ² a)				
Demanda energética total	6.912	24,5	127,1	11,3	55,2	1,0
Demanda energética para refrigeración	6.912	1,0	3,8	1,9	17,8	0,0
Demanda energética para calefacción	6.912	23,5	126,5	11,2	55,2	1,0

Los valores promedios, varianza, desviación estándar, mínimo y máximo por parámetro y nivel para la demanda energética en refrigeración y calefacción en Concepción aparecen en el Anexo B.

4.2.4 Análisis de la demanda energética de todos los casos de estudio para Puerto Montt

Al Igual que en la ciudad de Concepción, en Puerto Montt tampoco existe, una demanda energética en refrigeración significativa. El promedio de la demanda energética en refrigeración de los 6.912 casos estudiados es según la tabla 4-12 en Puerto Montt 0,2 kWh/(m²a) con un máximo de 7,2 kWh/(m²a). El total o la suma de la demanda depende sólo de la demanda energética en calefacción. El valor promedio de la demanda energética total de los casos de estudio, es en Puerto Montt de 48,4 kWh/(m²a) casi el doble que en Concepción y Santiago.

La desviación estándar y el valor máximo muestran un rango mayor que en Santiago y Concepción con una dispersión más alta de los resultados de los casos de estudio, lo que significa que los casos de estudio, los cuales cuentan con una configuración desfavorable de los parámetros, tendrán una demanda energética mucho más elevada que los casos que cuentan con la configuración óptima.

Tabla 4-12: Resumen de la demanda energética de todos los casos de estudio en Puerto Montt. La tabla muestra los valores: cantidad, media, varianza, desviación estándar, máximo y mínimo para la demanda energética total, de refrigeración y de calefacción (elaboración propia).

	Cantidad de casos	Promedio	Varianza	Desviación Estándar	Máximo	Mínimo
	Nº	kWh/(m ² a)				
Demanda energética total	6.912	48,4	374,9	19,4	98,5	5,8
Demanda energética para refrigeración	6.912	0,2	0,4	0,6	7,2	0,0
Demanda energética para calefacción	6.912	48,2	375,9	19,4	98,5	5,8

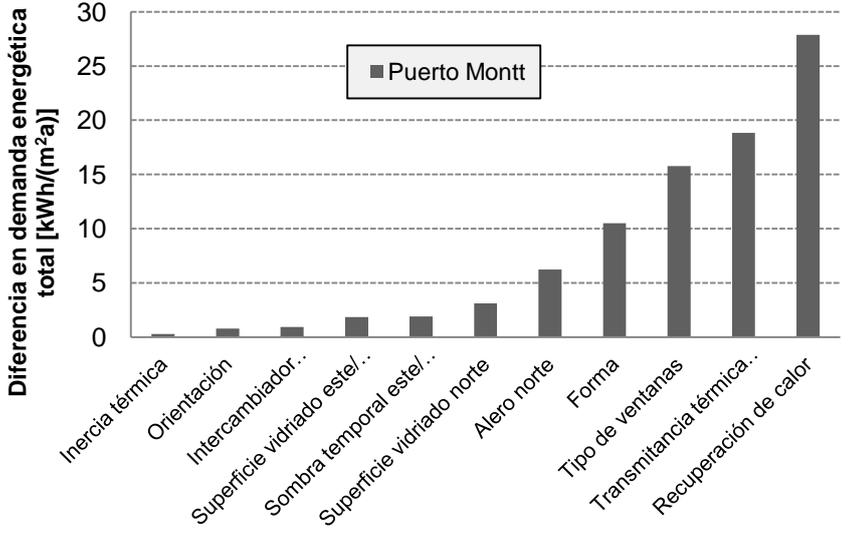
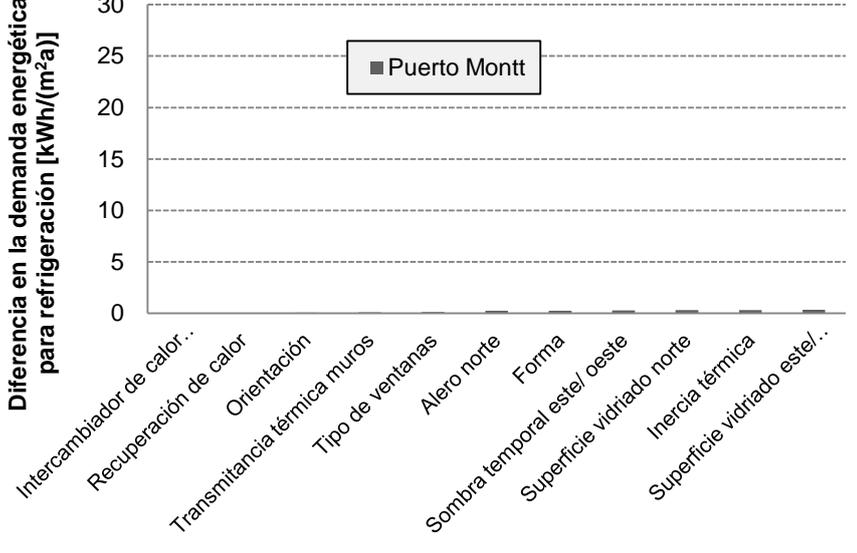
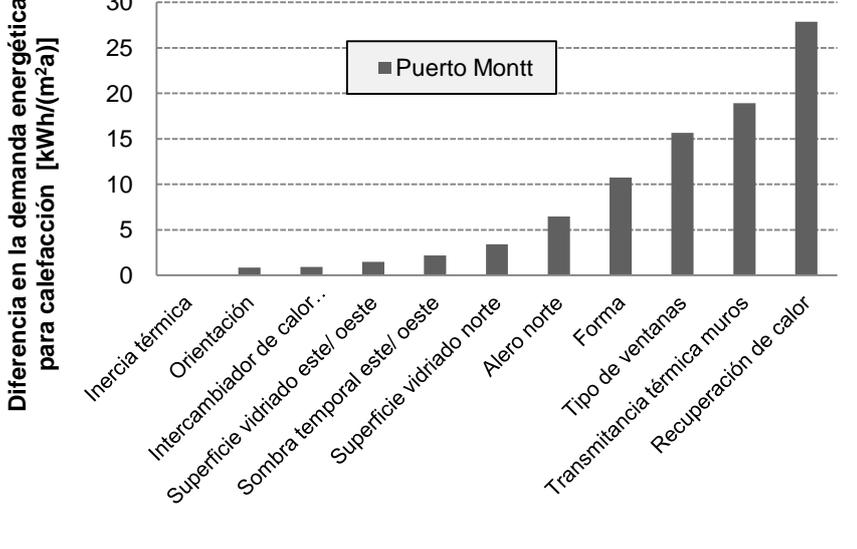
En la tabla 4-13, se resume gráficamente la influencia de los parámetros con sus cambios de niveles en la demanda energética total, de refrigeración y de calefacción. Los parámetros más significativos que influyen en la demanda de calefacción son los mismos que en Concepción. La demanda de refrigeración 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 parámetro con mayor influencia en la demanda energética es el sistema de ventilación con recuperación de calor. El hecho de tener recuperación de calor, se puede reducir la demanda energética en más de 25 kWh/(m²a). También, bajando los valores U del muro de 0,5 W/(m²K) a menor o igual a 0,2 W/(m²K) significa una reducción de la demanda energética de 18,9 kWh/(m²a) y utilizando ventanas de doble vidrio hermético con una capa de baja emisividad y relleno de gas argón, se reduce la demanda energética en comparación a ventanas termo paneles en un 15,6 kWh/(m²a).

Considerando la demanda energética de aprox. 15 kWh/(m²a) en calefacción, permitida para cumplir con el estándar Passivhaus, son esenciales los aportes en eficiencia 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, de una buena aislación térmica y de ventanas de una calidad superior.

Los valores promedios, varianza, desviación estándar, mínimo y máximo por parámetro y nivel para la demanda energética en refrigeración y calefacción en Puerto Montt aparecen en el Anexo B.

Tabla 4-13: Influencia de los parámetros investigados en la diferencia de la demanda energética en Puerto Montt separado por demanda energética total, de refrigeración y de calefacción (elaboración propia).

<p>Influencia de los parámetros investigados a la demanda energética en total (suma de refrigeración y calefacción) expresado en kWh/(m²a) en Puerto Montt</p>	 <table border="1"> <caption>Data for Total Energy Demand Chart</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Diferencia en demanda energética total [kWh/(m²a)]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Inercia térmica</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Orientación</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>Intercambiador de calor</td><td>1.5</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado este/este</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>Sombra temporal este/este</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado norte</td><td>3.5</td></tr> <tr><td>Alero norte</td><td>6.5</td></tr> <tr><td>Forma</td><td>10.5</td></tr> <tr><td>Tipo de ventanas</td><td>16.0</td></tr> <tr><td>Transmitancia térmica</td><td>19.0</td></tr> <tr><td>Recuperación de calor</td><td>28.0</td></tr> </tbody> </table>	Parámetro	Diferencia en demanda energética total [kWh/(m ² a)]	Inercia térmica	0.5	Orientación	1.0	Intercambiador de calor	1.5	Superficie vidriado este/este	2.0	Sombra temporal este/este	2.5	Superficie vidriado norte	3.5	Alero norte	6.5	Forma	10.5	Tipo de ventanas	16.0	Transmitancia térmica	19.0	Recuperación de calor	28.0
Parámetro	Diferencia en demanda energética total [kWh/(m ² a)]																								
Inercia térmica	0.5																								
Orientación	1.0																								
Intercambiador de calor	1.5																								
Superficie vidriado este/este	2.0																								
Sombra temporal este/este	2.5																								
Superficie vidriado norte	3.5																								
Alero norte	6.5																								
Forma	10.5																								
Tipo de ventanas	16.0																								
Transmitancia térmica	19.0																								
Recuperación de calor	28.0																								
<p>Influencia de los parámetros investigados a la demanda energética para refrigeración expresado en kWh/(m²a) en Puerto Montt</p>	 <table border="1"> <caption>Data for Refrigeration Demand Chart</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Diferencia en la demanda energética para refrigeración [kWh/(m²a)]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Intercambiador de calor</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Recuperación de calor</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Orientación</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Transmitancia térmica muros</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Tipo de ventanas</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Alero norte</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Forma</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Sombra temporal este/oeste</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado norte</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Inercia térmica</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado este/este</td><td>0.1</td></tr> </tbody> </table>	Parámetro	Diferencia en la demanda energética para refrigeración [kWh/(m ² a)]	Intercambiador de calor	0.1	Recuperación de calor	0.1	Orientación	0.1	Transmitancia térmica muros	0.1	Tipo de ventanas	0.1	Alero norte	0.1	Forma	0.1	Sombra temporal este/oeste	0.1	Superficie vidriado norte	0.1	Inercia térmica	0.1	Superficie vidriado este/este	0.1
Parámetro	Diferencia en la demanda energética para refrigeración [kWh/(m ² a)]																								
Intercambiador de calor	0.1																								
Recuperación de calor	0.1																								
Orientación	0.1																								
Transmitancia térmica muros	0.1																								
Tipo de ventanas	0.1																								
Alero norte	0.1																								
Forma	0.1																								
Sombra temporal este/oeste	0.1																								
Superficie vidriado norte	0.1																								
Inercia térmica	0.1																								
Superficie vidriado este/este	0.1																								
<p>Influencia de los parámetros investigados a la demanda energética para calefacción expresado en kWh/(m²a) en Puerto Montt</p>	 <table border="1"> <caption>Data for Heating Demand Chart</caption> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Diferencia en la demanda energética para calefacción [kWh/(m²a)]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Inercia térmica</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Orientación</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>Intercambiador de calor</td><td>1.5</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado este/oeste</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>Sombra temporal este/oeste</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>Superficie vidriado norte</td><td>3.5</td></tr> <tr><td>Alero norte</td><td>6.5</td></tr> <tr><td>Forma</td><td>10.5</td></tr> <tr><td>Tipo de ventanas</td><td>16.0</td></tr> <tr><td>Transmitancia térmica muros</td><td>19.0</td></tr> <tr><td>Recuperación de calor</td><td>28.0</td></tr> </tbody> </table>	Parámetro	Diferencia en la demanda energética para calefacción [kWh/(m ² a)]	Inercia térmica	0.5	Orientación	1.0	Intercambiador de calor	1.5	Superficie vidriado este/oeste	2.0	Sombra temporal este/oeste	2.5	Superficie vidriado norte	3.5	Alero norte	6.5	Forma	10.5	Tipo de ventanas	16.0	Transmitancia térmica muros	19.0	Recuperación de calor	28.0
Parámetro	Diferencia en la demanda energética para calefacción [kWh/(m ² a)]																								
Inercia térmica	0.5																								
Orientación	1.0																								
Intercambiador de calor	1.5																								
Superficie vidriado este/oeste	2.0																								
Sombra temporal este/oeste	2.5																								
Superficie vidriado norte	3.5																								
Alero norte	6.5																								
Forma	10.5																								
Tipo de ventanas	16.0																								
Transmitancia térmica muros	19.0																								
Recuperación de calor	28.0																								

4.3 Análisis comparativo de la demanda energética de los casos que lograron el estándar Passivhaus versus los casos de referencia

4.3.1 Diferencia entre casas pasivas y casos de referencia en la demanda energética total

Anteriormente se analizaron los casos de estudio de acuerdo al cumplimiento con el estándar Passivhaus y a su demanda energética. Primero se clasificaron los casos de estudio, en los casos que lograron el estándar y en los casos que no lo lograron. Después, se analizó la influencia de los parámetros y sus niveles en la clasificación y en la demanda energética. En la tabla 4-6 se mostró la demanda energética de los casos que cumplieron con el estándar. Se obtuvo una demanda energética promedio total, en refrigeración y calefacción en Santiago de 18,0 kWh/(m²a), en Concepción de 18,7 kWh/(m²a) y en Puerto Montt de 26,7 kWh/(m²a).

Más adelante, se compara esta demanda energética de los casos Passivhaus con los casos de referencia, los cuales cumplen con los requisitos de la reglamentación térmica vigente en Chile. Se analiza, si las casas pasivas tienen una demanda energética realmente más baja que casas construidas según norma actual y se determina el valor de la reducción. Para realizar esta comparación, se analizaron, a través de simulaciones térmicas, con el software EnergyPlus (EnergyPlus, 2010), para cada uno de los 20.736 casos de estudio su respectivo caso de referencia, que cuenta con una configuración según reglamentación térmica (MINVU, 2006). Los resultados de la demanda energética de los casos de referencia obtenidos de las simulaciones térmicas, poseen coincidencia con los resultados publicados por otros autores como (Bustamante, et al., 2009; Bustamante, 2008; Krämer and Nordsieck, 2009). La demanda energética promedio de los casos de referencia varía por zona, entre 85,7 kWh/(m²a) y 116,8 kWh/(m²a).

En la tabla 4-14, se muestra la demanda energética en refrigeración y en calefacción, más la suma de las dos para los casos que lograron el estándar Passivhaus y sus casos de referencia. Se individualiza los resultados para las ciudades de Santiago, Concepción y Puerto Montt. Las casas Passivhaus tienen una demanda energética significadamente más baja que los casos de referencia. La diferencia en la demanda energética total es, para las tres ciudades estudiadas, de aproximadamente un 80%. Esto significa que las casas pasivas en Chile tienen un ahorro en demanda energética en comparación a la reglamentación térmica vigente de aprox. un 80%. En Concepción y Puerto Montt esta diferencia en demanda energética depende sólo de la calefacción, dado que ni en las casas pasivas ni en las casas de referencia, existe una demanda energética en refrigeración. En Santiago se puede observar que las casas según estándar Passivhaus muestran además, una demanda energética en refrigeración más baja que los casos de referencia.

Tabla 4-14: Valores promedios de la diferencia en la demanda energética total, de calefacción y de refrigeración entre los casos que cumplen con el estándar Passivhaus y sus casos de referencia (elaboración propia).

			Demanda energética (Q)		
			refrigeración (promedio)	calefacción (promedio)	total (promedio)
Santiago	Casos Passivhaus	[kWh/m ² a]	6,4	11,6	18,0
	Caso de referencia	[kWh/m ² a]	11,1	74,6	85,7
	Ahorro	[%]	42	84	79
Concepción	Casos Passivhaus	[kWh/m ² a]	0,3	18,4	18,7
	Caso de referencia	[kWh/m ² a]	0,3	90,6	90,9
	Ahorro	[%]	~0	80	79
Puerto Montt	Casos Passivhaus	[kWh/m ² a]	0,1	26,7	26,7
	Caso de referencia	[kWh/m ² a]	0,0	116,8	116,8
	Ahorro en	[%]	~0	77	77

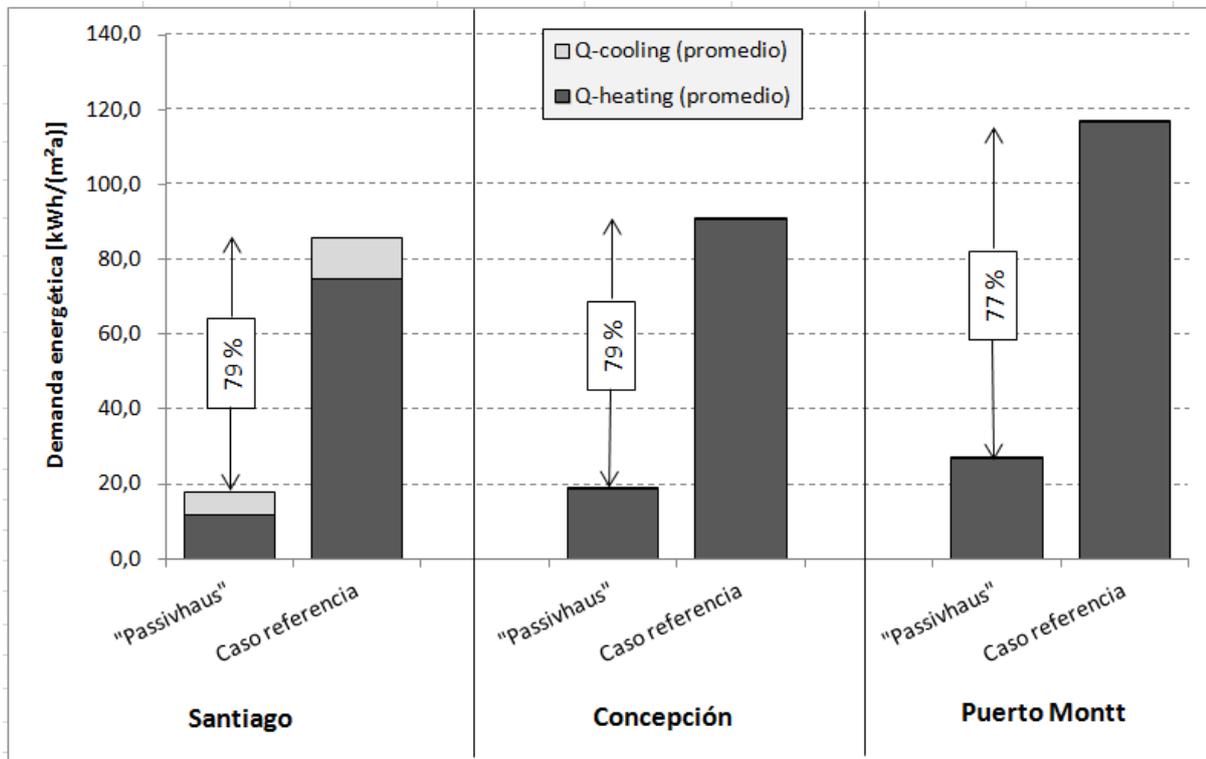


Ilustración 4-7: Diferencia en la demanda energética entre los casos de estudio que lograron el estándar Passivhaus y sus casos de referencia según reglamentación térmica RT en [kWh/(m²a)] (Fuente: elaboración propia).

Se grafican los resultados de la tabla 4-14 en la ilustración 4-7. Los casos de referencia, igual que los casos Passivhaus, tienen una demanda energética la cual aumenta de norte a sur dado las diferencias en las condiciones climáticas. Aunque el porcentaje de ahorro no tiene mucha variación entre Santiago y Puerto Montt, sí hay variaciones en los valores totales en la demanda energética que aumentan de Santiago a Puerto Montt. En Santiago la diferencia es 67,7 kWh/(m²a), en Concepción 72,2 kWh/(m²a) y en Puerto Montt 90,1 kWh/(m²a). Esta diferencia surge generalmente de la alta demanda de los casos de referencia, dado que los casos Passivhaus tienen una demanda parecida en las tres ciudades estudiadas. Como se ha descrito anteriormente, en Santiago también existe una reducción de la demanda energética en refrigeración en las casas Passivhaus, lo que significa que este estándar igualmente tiene ventajas en climas calurosos o de verano y no sólo en climas de bajas temperaturas o de invierno. Para adaptar el estándar a otras situaciones climáticas, hay que considerar otras estrategias en el diseño como se ha mencionado anteriormente, en este capítulo.

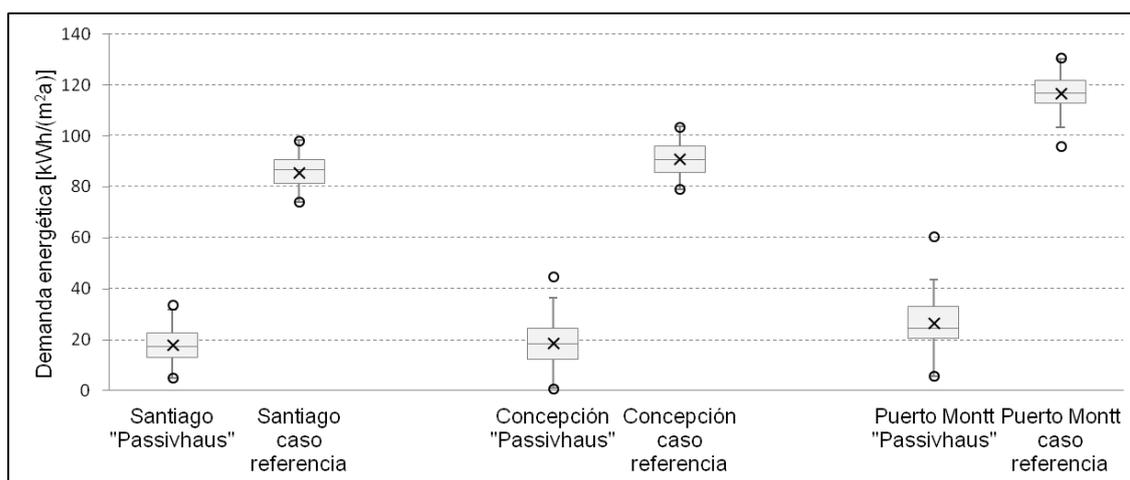


Ilustración 4-8: Demanda energética en la suma de calefacción y refrigeración de las casas Passivhaus versus los casos de referencia [kWh/(m²a)] en tres ubicaciones distintas (elaboración propia).

En la ilustración 4-8 se muestra la demanda energética total en forma de un diagrama de caja. Es interesante observar el hecho que, las casas construidas según el estándar Passivhaus y sus casas de referencia en Europa central, tienen una diferencia porcentual en la demanda energética similar a la diferencia obtenida en este estudio para Chile. Feist (Feist, et al., 2001) habla por ejemplo de un ahorro de 83% y según el presente estudio, en Chile el ahorro es aprox. de un 78%. Los valores absolutos igualmente son parecidos. Feist habla de una demanda energética de los casos de referencia entre 90-150 kWh/(m²a) y de las casas Passivhaus alrededor de 15 kWh/(m²a). Esto significa, que una persona en Chile, considerando, siempre las mismas condiciones de confort interior, gasta casi la misma cantidad de energía para climatizar su casa que en Europa central, con su clima mucho más severo.

4.3.2 Diferencia entre casas pasivas y casos de referencia en la demanda energética para calefacción y refrigeración por separado

Como se demuestra en la tabla 4-14 y la ilustración 4-7, existe una diferencia en la demanda energética entre las casas Passivhaus y sus casas de referencia. Esta diferencia es la suma de la demanda energética en calefacción y en refrigeración. En la ilustración 4-9 y la ilustración 4-10, se divide la demanda energética en calefacción y refrigeración. Los gráficos del tipo diagrama de caja muestran los valores mínimos, máximos, los cuartiles y el valor promedio. Se observa, como ya se describió anteriormente, que con los parámetros elegidos en el estudio, se pueden obtener algunos casos cuya demanda energética en calefacción en Santiago y en Concepción de casi cero. Lograr esta meta en Puerto Montt será más difícil y se debe considerar una calidad térmica de la envolvente mejorada en comparación a los valores utilizados en el presente estudio.

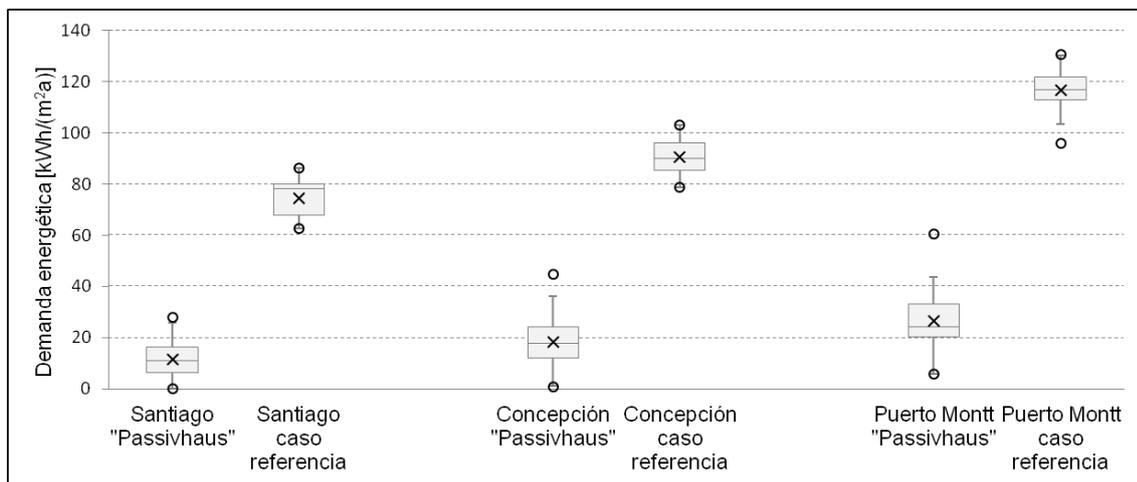


Ilustración 4-9: Demanda energética en calefacción de las casas Passivhaus versus los casos de referencia [kWh/(m²a)] en tres ubicaciones distintas (elaboración propia).

En la ilustración 4-10 se grafican los diagramas de caja de la demanda energética para refrigeración en Santiago, Concepción y Puerto Montt. En Concepción y Puerto Montt no existe una demanda energética en refrigeración, ni para los casos que lograron el estándar Passivhaus, ni para los casos de referencia, ni siquiera aparecen algunos casos extremos, que requieren refrigeración activa en verano. En el clima de la ciudad de Santiago aparece una demanda energética en refrigeración, tanto para casos Passivhaus, como para los casos de referencia, aunque la demanda en los casos que cumplieron con el estándar, es más baja que en sus casos de referencia.

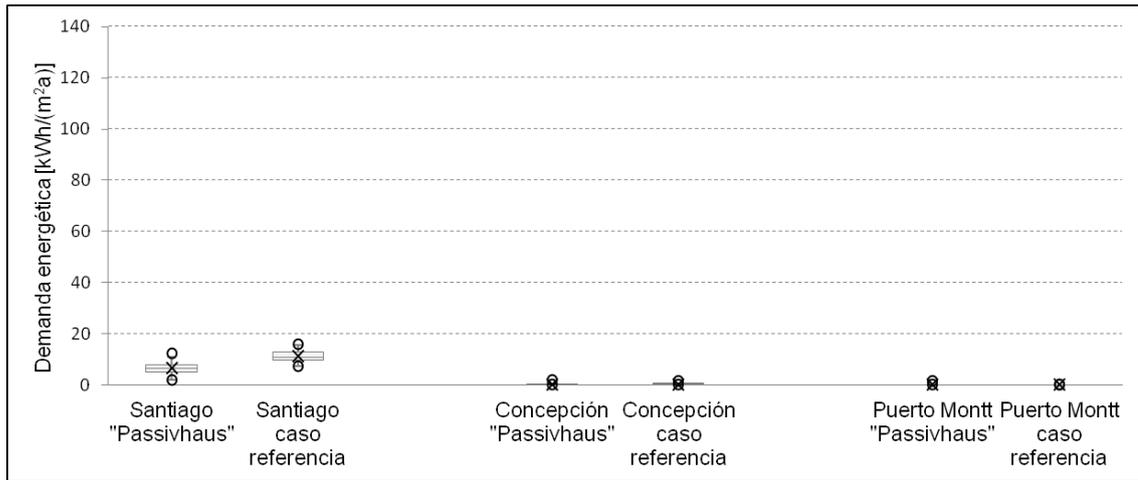


Ilustración 4-10: Demanda energética en refrigeración de las casas Passivhaus versus los casos de referencia [kWh/(m²a)] en tres ubicaciones distintas (elaboración propia).

4.4 Análisis de los casos los cuales muestran la demanda energética más alta y más baja

En el análisis de los casos de estudio se demostró que existen algunos casos extremos. En los gráficos box-plot o diagrama de caja están marcados estos casos extremos como los puntos de máximo y mínimo. Se pueden observar estos casos extremos, igualmente en la tabla 4-5, donde son graficados por los puntos, por una parte de casi cero demanda energética, y por otra parte, por los puntos que tienen una demanda energética más alta que los otros casos de estudio.

Para determinar, cual nivel de cada parámetro es el más favorable o desfavorable para la demanda energética, se extrae y analiza los casos extremos, que se definen por el 1% del total de los casos de cada ciudad, el cual tiene la demanda energética total más alta o más baja. Con el análisis del 1% de los casos extremos, se obtiene un resultado más global sobre la situación, en comparación a un análisis de un solo caso extremo. Se observa la frecuencia del nivel de cada parámetro y se determina el nivel más favorable o desfavorable según la frecuencia más alta.

4.4.1 Casos de estudio cuya demanda energética en calefacción y refrigeración es más baja

A continuación se muestra por cada ciudad, el promedio del 1% de los casos de estudio, los cuales obtuvieron la demanda energética total de refrigeración y calefacción más baja. En la tabla 4-15 se puede ver el nivel más favorable de cada parámetro para obtener una demanda energética muy baja. En general, no se presentan diferencias en el valor de los niveles

de cada parámetro entre las distintas ciudades. La única diferencia es que en Santiago, es más favorable reducir la superficie vidriada al norte para evitar un sobrecalentamiento, mientras que en Concepción y Puerto Montt es recomendable tener una superficie vidriada grande hacia el norte, para maximizar las ganancias solares. Con los parámetros y sus rangos estudiados es posible tener casas con una demanda energética total entre 3 a 10 kWh/(m²a).

Si se ampliaran los rangos de los niveles de cada parámetro, posiblemente sería más factible realizar casas que tuviesen una demanda energética nula en calefacción y refrigeración. En Santiago hay que optimizar la protección solar en verano, ya sea, con elementos de sombra temporal automáticos u optimizar el intercambiador de calor subsuelo-aire para maximizar su eficiencia. En Concepción y Puerto Montt hay que aumentar la calidad térmica de la envolvente y optimizar el diseño arquitectónico para maximizar las ganancias solares. El aumento de la calidad térmica de la envolvente, es factible con productos aislantes del mercado nacional. Se pueden lograr valores U de 0,15 W/(m²K) con la agregación de más aislación térmica y utilizar ventanas con triple vidriado hermético, low-E y posiblemente un relleno con gas argón.

Tabla 4-15: Demanda energética mínima de los casos con la mejor combinación de los niveles de los parámetros para Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).

	Santiago	Concepción	Puerto Montt
Orientación	Norte (0°)	Norte (0°)	Norte (0°)
Forma	Compacta	Compacta	Compacta
Superficie vidriada este/ oeste	15% del muro	15% del muro	15% del muro
Superficie vidriada norte	15% del muro	70% del muro	70% del muro
Alero norte	No	No	No
Sombra temporal este/ oeste	Si	Si	Si
Tipo de ventanas	U=1,3_g=0,64	U=1,3_g=0,64	U=1,3_g=0,64
Transmitancia térmica muros	U = 0,2	U=0,2	U=0,2
Inercia térmica	Alta	Alta	Alta
Recuperación de calor	Si	Si	Si
Intercambiador de calor subsuelo-aire	Si	Si	Si
Demanda en energía total (promedio) [kWh/(m ² a)]	7,1	3,6	10,5
Demanda en energía calefacción (promedio) [kWh/(m ² a)]	2,5	3,3	10,9
Demanda en energía refrigeración (promedio) [kWh/(m ² a)]	4,6	0,3	0,1

Según las definiciones actualmente utilizadas en la literatura, una casa de cero demanda energética en calefacción y refrigeración no es una casa de cero consumo energético, dado que este tipo de casa todavía requiere energía para agua caliente sanitaria, cocina, electricidad para los electrodomésticos, iluminación y el sistema de ventilación con recuperación de calor. Para cubrir esta demanda hay que agregar a la casa alguna fuente de generación de energía, como por ejemplo, paneles fotovoltaicos.

La realización más común de casas de cero consumo energético es, según (Hernandez and Kenny, 2010) a través de una conexión a la red eléctrica. Por una parte, se utiliza la red como fuente de energía y por otra parte, para entregar energía y así, se evita la implementación de un sistema para almacenar la energía en la casa. Este tipo de casas de cero consumo energético con conexión a la red se denomina casas de cero consumo energético neto. El término neto se utiliza para expresar que el balance energético anual debe ser cero, lo cual, significa que la casa no debe consumir más energía que la que entrega a la red. En Chile no existe, hasta ahora (comienzo 2012), una ley que permita vender energía a la red, por lo tanto será difícil realizar, por ahora, este tipo de casa de cero consumo energético con conexión a la red.

Pero, como se demostró anteriormente, es muy factible realizar casas entre Santiago y Puerto Montt que tengan una demanda energética cero en calefacción y refrigeración, asegurando un confort térmico interior según normas internacionales.

4.4.2 Casos de estudio cuya demanda energética en calefacción y refrigeración es más elevada

Por otra parte, una demanda energética elevada y más alta que el resto de los casos de estudio, es producto de una combinación desfavorable de los distintos niveles de los parámetros. Se analiza el 1% del total de los casos de estudio, que muestran la demanda energética total más elevada para cada ciudad y se determinó el nivel de cada parámetro que corresponde a esta demanda elevada. Los resultados se grafican en la tabla 4-16.

En la ciudad de Santiago, los niveles más desfavorables pertenecen generalmente a los parámetros que aumentan la demanda energética en refrigeración, como por ejemplo, los porcentajes de superficies vidriadas altas, la no existencia de elementos de sombra y una inercia térmica baja. Por otra parte, los casos más desfavorables en Santiago muestran, una transmitancia térmica alta, ventanas termo paneles comunes y que no cuentan ni con recuperación de calor ni con un intercambiador subsuelo-aire.

En Concepción, dominan generalmente los niveles más desfavorables de los parámetros que provocan un aumento de la demanda energética en calefacción. Además se observa,

Capítulo 4.

que los casos tienen un porcentaje bajo de las superficies vidriadas y cuentan con elementos de sombra, por lo tanto no se puede aprovechar las ganancias solares al máximo.

Los criterios descritos para la ciudad de Concepción, tienen la misma validez para Puerto Montt, con la única diferencia que en Puerto Montt, las superficies vidriadas de gran tamaño y con vidrio termo panel común, provocan más pérdidas de calor que ganancias solares, por lo tanto, aumenta la demanda energética.

Los resultados de la demanda energética total, obtenidos para el 1% de los casos más desfavorables, todavía muestran valores más favorables que aquellos de las casas construidas según la reglamentación térmica, dado que los rangos de los niveles de los parámetros, fueron elegidos para lograr un estándar energético alto.

En comparación a los casos más favorables del párrafo anterior, se observa un aumento de la demanda energética de aproximadamente un factor 10, lo que significa que los casos con la mejor configuración consumen aprox. 10 veces menos energía que los casos con la peor configuración.

Tabla 4-16: Demanda energética máxima de los casos con la peor combinación de los niveles de los parámetros para Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).

	Santiago	Concepción	Puerto Montt
Orientación	Noroeste (315°)	Noroeste (315°)	Norte (0°)
Forma	Compacta	Irregular	Irregular
Superficie vidriada este/ oeste	40% del muro	15% del muro	40% del muro
Superficie vidriada norte	70% del muro	15% del muro	70% del muro
Alero norte	No	Si	Si
Sombra temporal este/ oeste	No	Si	Si
Tipo de ventanas	U=2,7_g=0,78	U=2,7_g=0,78	U=2,7_g=0,78
Transmitancia térmica muros	U = 0,5	U = 0,5	U = 0,5
Inercia térmica	Baja	Baja	Alta
Recuperación de calor	No	No	No
Intercambiador de calor subsuelo-aire	No	No	No
Demanda en energía total (promedio) [kWh/(m²a)]	70,1	52,5	93,6
Demanda en energía calefacción (promedio) [kWh/(m²a)]	20,0	51,6	93,6
Demanda en energía refrigeración (promedio) [kWh/(m²a)]	50,1	0,9	0,0

4.5 Análisis de la reducción de la demanda energética del sistema de ventilación con recuperación de calor versus el consumo energético del mismo sistema

Casas de muy bajo consumo energético cuentan generalmente, con una envolvente altamente hermética para minimizar las pérdidas por infiltración de aire. Por condiciones de higiene y de confort, se debe garantizar el intercambio de aire interior, a través de un cierto flujo de aire exterior, por persona y por hora, lo cual se puede lograr a través de ventilación tradicional por las ventanas, o con ventilación forzada. En ambos casos, el aire que escapa, sale con la temperatura interior de la casa e ingresa aire fresco con la temperatura exterior, lo que significa en invierno una fuerte pérdida de energía. Para minimizar las pérdidas por ventilación, se debe bajar el intercambio de aire a un nivel mínimo necesario, lo cual se puede garantizar con la instalación de equipos de ventilación forzada con recuperación de calor, que incluya un intercambiador de calor aire-aire. Los intercambiadores más eficientes del mercado, son de contraflujo cruzado y tienen una eficiencia de recuperación de hasta un 95% de la temperatura del aire interior.

En el presente estudio, se considera en las casas estudiadas un sistema de ventilación mecánico, para garantizar el cambio de aire adecuado. Se analiza el sistema de ventilación con recuperación de calor y sin recuperación de calor. Luego, se analiza si la recuperación de calor tiene ventajas en los climas estudiados y se determina cuál es su rendimiento o el "COP"². Para calcular el rendimiento de la recuperación de calor, se determina primero, el consumo eléctrico de la operación de los ventiladores del sistema de ventilación y de su control. En segundo lugar, se determina cuanta energía se puede recuperar a través del sistema en un año y en tercer lugar, se calcula el coeficiente "COP" entre energía entregada y energía consumida.

Se determina primero, la energía auxiliar promedio Q_{aux} para un sistema de ventilación con recuperación de calor en invierno. Según las descripciones en los capítulos anteriores, se calcula con un caudal de aire de 30 m³/(persona y hora) y con 22 m² superficie útil por persona. Los sistemas de ventilación con recuperación de calor apropiados para casas pasivas, deben tener según (Feist, et al., 2007) un consumo máximo de energía eléctrica de 0,45 Wh/(m³ de aire) en invierno y un consumo máximo de 0,25 Wh/(m³ de aire) en verano. En verano se activa un bypass para el intercambiador de calor, por lo tanto, baja la pérdida de presión interna y los ventiladores consumen menos energía. Se considera para el análisis,

² El COP (coefficient of performance) o coeficiente de rendimiento de una bomba de calor (o de un climatizador) es la relación entre la potencia térmica y su consumo eléctrico.

un tiempo de operación del sistema durante 6 meses, dado que sólo en los 6 meses, que corresponde al período de invierno, se tendrá un ahorro energético en calefacción por recuperación de calor. Se estima, según los siguientes cálculos, que los sistemas de ventilación con recuperación de calor tendrán, con un tiempo de operación de 6 meses en invierno, un consumo energético de 2,7 kWh/(m²a).

$$V_{aire} = 30 \frac{m^3 \text{aire}}{(22 \text{ m}^2 \text{superficie} * \text{hora})} = 1,364 \frac{m^3 \text{aire}}{m^2 \text{superficie} * \text{hora}} \quad (4.1)$$

$$p_{vent} = 1,364 \frac{m^3 \text{aire}}{m^2 \text{superficie} * \text{hora}} * 0,45 \frac{Wh}{m^3 \text{aire}} = 0,614 \frac{W}{m^2 \text{superficie}} \quad (4.2)$$

$$Q_{vent} = 0,614 \frac{W}{m^2 \text{superficie}} * 24 \frac{h}{d} * \frac{365d}{2a} = 2689 \frac{Wh}{m^2 a} = 2,7 \frac{kWh}{m^2 a} \quad (4.3)$$

Tabla 4-17: Resumen del análisis del rendimiento del sistema de ventilación considerando Si y No la recuperación de calor en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).

			Demanda en energía total (promedio)		
			Santiago	Concepción	Puerto Montt
Recuperación de calor	Si	[kWh/(m ² a)]	24,9	16,6	34,5
	No	[kWh/(m ² a)]	34,0	32,4	62,3
Diferencia entre Si / No (energía entregada)		[kWh/(m ² a)]	9,1	15,8	27,8
Consumo del sistema de ventilación en invierno (energía recibida)		[kWh/(m ² a)]	2,7	2,7	2,7
Ahorro total (incluyendo el consumo del equipo)		[kWh/(m ² a)]	6,4	13,1	25,1
Relación entre energía entregada y energía recibida ("COP")		[-]	(3,4)	(5,9)	(10,3)

Los valores de la relación entre energía entregada y energía recibida ("COP"), dependen en general, de la eficiencia del equipo y de las condiciones climáticas. La relación entre energía entregada y energía recibida, se puede explicar como el coeficiente entre la cantidad de kWh ahorrado en calefacción por kWh gastado en electricidad para la operación de los ventiladores. Dado que las condiciones climáticas, en Santiago son más bajas que en Puerto Montt, se logra en Santiago una relación de 3, en Concepción de 6 y en Puerto Montt de 10.

Estos valores obtenidos son más bajos, que los valores de relación entre energía entregada y energía recibida según (Schulze-Darup, 2003). El se refiere, para el caso de Alemania, de valores entre 15 a 20. Los rendimientos más altos, se explican por las diferencias climáticas entre el invierno en Alemania y el invierno de las regiones estudiadas. Las pérdidas por ventilación en Alemania, con temperaturas de, a veces -20°C , son mayores que las pérdidas en las zonas estudiadas en Chile con temperaturas mínimas de aprox. menos 5°C .

Se concluye que, equipos eficientes muestran en las tres ubicaciones climáticas estudiadas, generalmente un rendimiento (COP) mayor que 1, lo que significa que el equipo consume menos energía auxiliar, que entrega a través de la reducción de la demanda energética en calefacción. En Puerto Montt por ejemplo, se gasta una kWh electricidad para la operación de los ventiladores, y obtiene una reducción promedio de la demanda energética en calefacción de 10 kWh.

4.6 Recomendaciones para el diseño de casas de baja demanda energética en Santiago, Concepción y Puerto Montt, basadas en el análisis de la clasificación y del consumo energético

4.6.1 Recomendaciones generales basadas en el análisis de la clasificación y del consumo energético y metodología utilizada

Basándose en los resultados del análisis de la clasificación y del consumo energético y, en especial, en el análisis de la influencia de los parámetros, se desarrollan algunas recomendaciones básicas para el diseño de casas de baja demanda energética en Santiago, Concepción y Puerto Montt. Con estas recomendaciones generales, se apunta a facilitar el proceso de diseño de casas de baja demanda energética, sobre todo, en la etapa de anteproyecto. Las recomendaciones no son muy detalladas y pretenden guiar un diseño de bajo consumo energético, no pretenden entregar resultados exactos sobre el consumo energético del proyecto arquitectónico. En el proceso de diseño de una vivienda o de un edificio, en que pretende lograr un estándar energético alto como el estándar Passivhaus, hay que calcular siempre la demanda energética, ya sea con métodos simplificados o con simulaciones térmicas. Se muestra a continuación recomendaciones que permiten llegar, en menos tiempo, a un resultado que logra cumplir con el estándar Passivhaus.

Los parámetros investigados, generalmente no muestran un comportamiento similar o de una magnitud similar para las tres ciudades, por lo tanto, se indican las recomendaciones para las ciudades por separado. Se desarrollan las recomendaciones, a través de un estudio

sobre la influencia e impacto de los parámetros, por su ganancia de información a través del cambio de un nivel al otro. Con esta información, se construye un “árbol de decisiones” para cada ciudad.

Un árbol de decisión es, según (Gabler Verlag, 2012): “Un modelo de predicción utilizado en el ámbito de la inteligencia artificial. Dada una base de datos se construyen diagramas de construcciones lógicas, muy similares a los sistemas de predicción basados en reglas, que sirven para representar y categorizar una serie de condiciones que ocurren de forma sucesiva, para la resolución de un problema. Un árbol de decisión tiene unas entradas, las cuales pueden ser un objeto o una situación descrita por medio de un conjunto de atributos y a partir de esto se devuelve una respuesta la cual es una decisión que es tomada a partir de las entradas Un árbol de decisión lleva a cabo un test a medida que este se recorre hacia las hojas para alcanzar así una decisión. El árbol de decisión suele contener nodos internos, nodos de probabilidad, nodos hojas y arcos. Un nodo interno contiene un test sobre algún valor de una de las propiedades. Un nodo de probabilidad indica que debe ocurrir un evento aleatorio de acuerdo a la naturaleza del problema, este tipo de nodos es redondo, los demás son cuadrados. Un nodo hoja representa el valor que devolverá el árbol de decisión y finalmente las ramas brindan los posibles caminos que se tienen de acuerdo a la decisión tomada.”

Luego, se desarrolla un árbol de decisiones para cada ciudad. El árbol comienza con el parámetro más importante y sigue con el segundo más importante hasta una profundidad de 3 nudos. La variable de respuesta o el resultado buscado es la demanda energética total, la cual es la suma de la demanda en refrigeración y calefacción. Los árboles muestran diferentes combinaciones de los parámetros más importantes para cada ciudad y su influencia a la demanda energética. Así se puede encontrar las combinaciones más favorables y recomendables. La demanda energética, entregada como variable de respuesta, es el promedio de todos los casos que cuentan con la combinación de los niveles de los parámetros elegidos, dado que los parámetros estudiados, a parte de la ubicación, son 11 y el árbol de decisiones cuenta sólo con 4 para reducir la complejidad. Esto significa que existen casos dentro del valor promedio los cuales muestran un mayor desempeño y casos que muestran un menor desempeño energético.

Uno de los parámetros estudiados muestra un comportamiento similar en las tres ciudades estudiadas, por lo tanto, se analiza a continuación. Este parámetro es la orientación de la fachada principal con respecto al norte. La pregunta investigada es: ¿Hay un cambio grande en lograr el estándar Passivhaus 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 noreste (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 emplazar la casa en el sitio y no tiene que respetar la orientación hacia el norte al 100%.

4.6.2 Recomendaciones generales para el diseño de casas de baja demanda energética en Santiago

La ilustración 4-11 muestra el árbol de decisiones, el cual puede guiar el proceso de diseño de una casa de baja demanda energética para la ciudad de Santiago. Un concepto general, para bajar la demanda energética en calefacción es minimizar las pérdidas y maximizar las ganancias. En el clima de la ciudad de Santiago, esta estrategia presenta un comportamiento contrario. Maximizando las ganancias solares, existe una alta posibilidad de producir un sobrecalentamiento y un aumento de la demanda energética de refrigeración en verano.

Como resultado en el árbol de decisiones, se muestran los casos con una superficie vidriada al este y oeste de 15% del muro, que obtienen un mejor comportamiento que los casos con ventanas grandes al este y oeste. Con el control de la magnitud de 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.

La segunda estrategia para lograr una demanda energética muy baja es la reducción de las pérdidas de calor en invierno. Este comportamiento se refleja en la parte inferior del diagrama. Se puede observar que con la incorporación de un sistema de ventilación con recuperación de calor, y una transmitancia térmica moderada de $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, se logra fácilmente una demanda energética promedia bajo de $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Para lograr estas demandas tan bajas, sin un sistema de ventilación con recuperación de calor, es necesario obtener valores U más bajas de $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ que se logra con la incorporación de mucha aislación térmica.

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 $U \leq 0,65 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

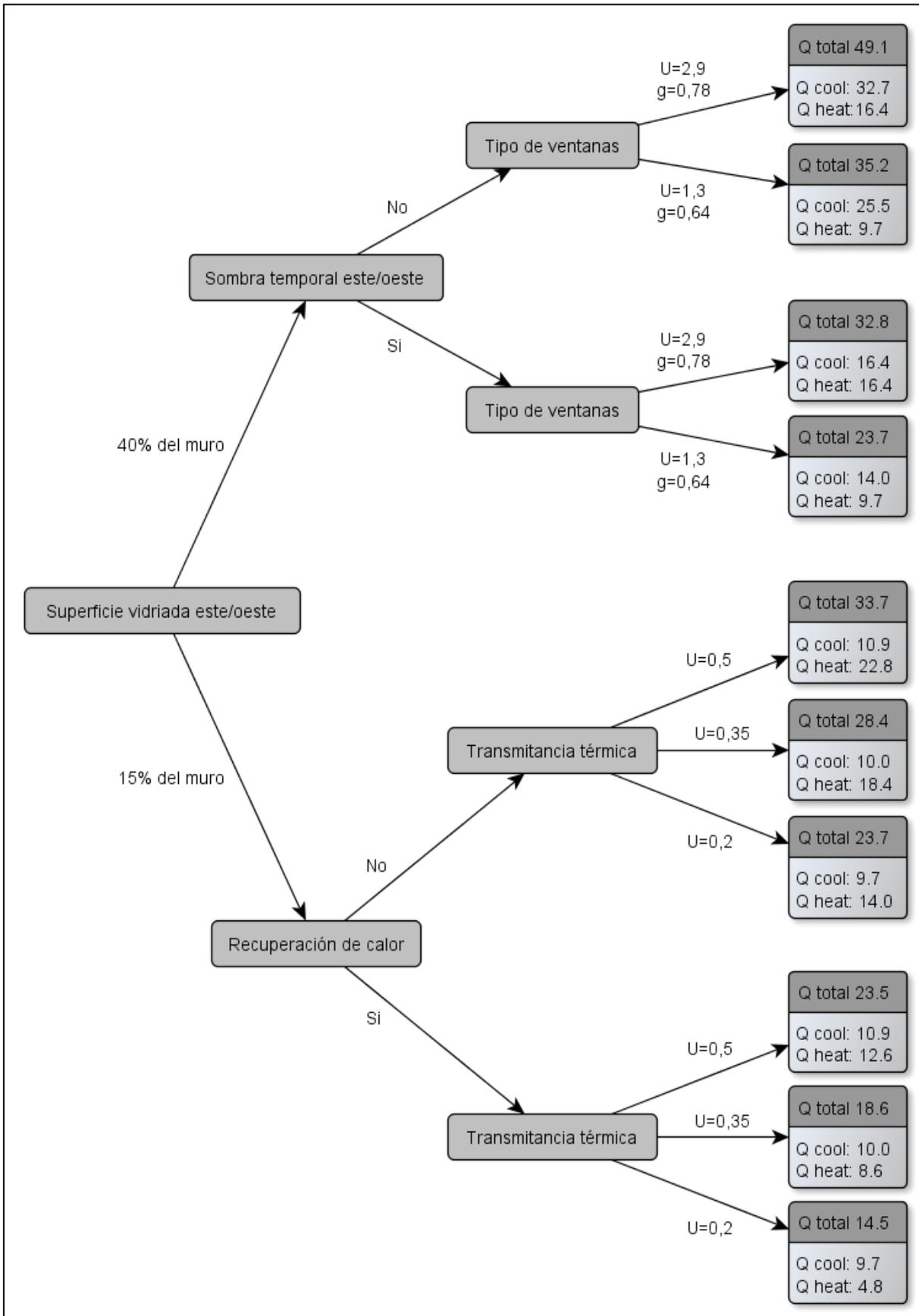


Ilustración 4-11: Árbol de decisiones para el proceso de diseño de casas de baja demanda energética en Santiago con la variable de respuesta: Q total promedio [kWh/(m²a)] (elaboración propia).

4.6.3 Recomendaciones generales para el diseño de casas de baja demanda energética en Concepción

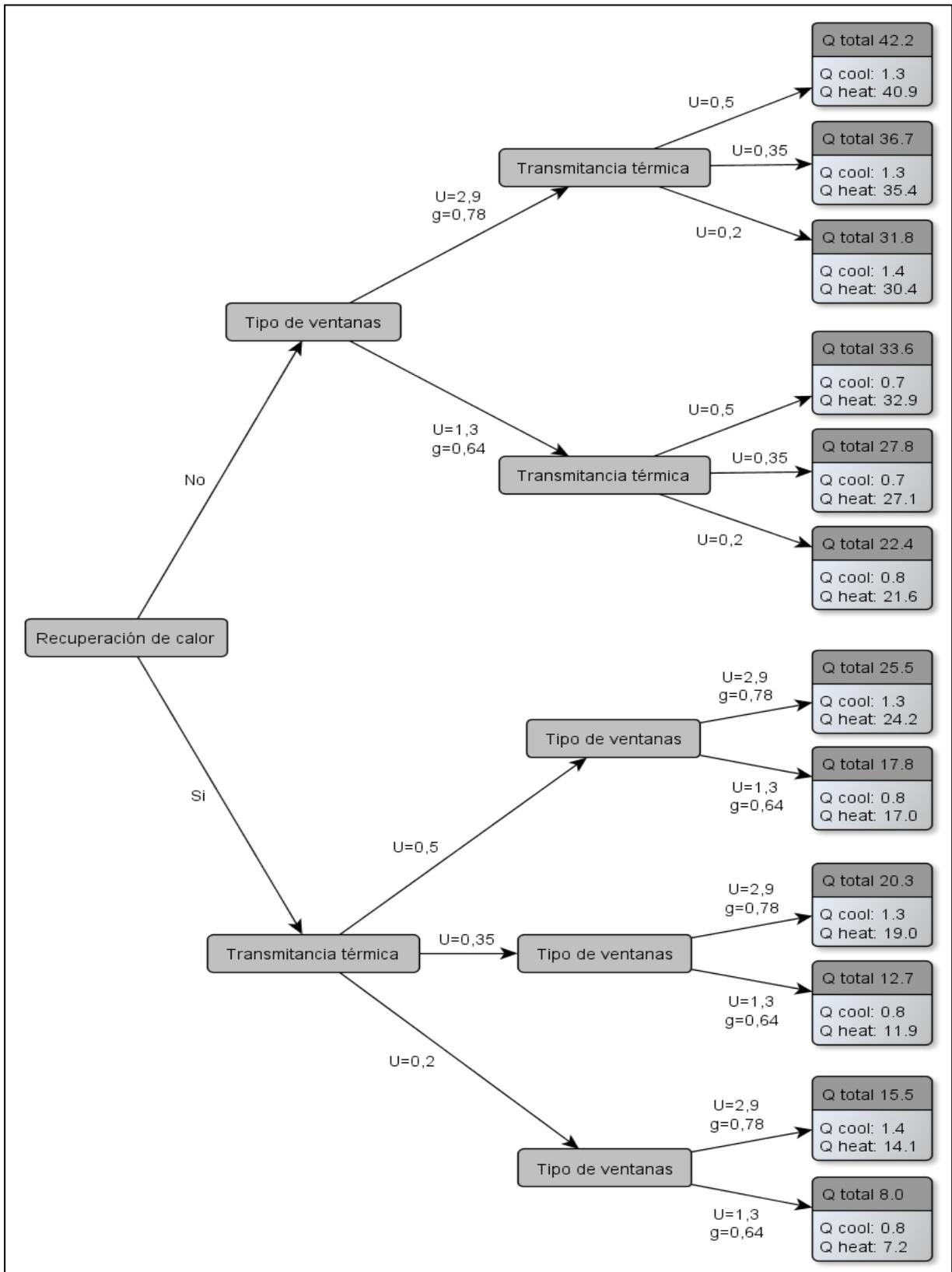


Ilustración 4-12: Árbol de decisiones para el proceso de diseño de casas de baja demanda energética en Concepción con la variable de respuesta: Q total promedio [kWh/(m²a)] (elaboración propia).

El concepto general, de maximizar las ganancias y minimizar las pérdidas para bajar la demanda energética en calefacción, es más factible de aplicar en Concepción que en Santiago, dado que no hay un riesgo alto de sobrecalentamiento en verano. Esto significa, que se puede concentrar en el diseño arquitectónico, generalmente en las estrategias, las cuales bajan la demanda energética en calefacción, sin preocuparse mucho en la demanda energética en refrigeración. Sin embargo, siempre es recomendable aplicar elementos de sombra para garantizar un confort térmico en verano.

Como se puede observar en la ilustración 4-12, en Concepción generalmente no es factible lograr una demanda energética en calefacción bajo de 15 kWh/(m²a), sin un sistema de ventilación con recuperación de calor. Además es recomendable tener una baja transmitancia térmica de la envolvente y ventanas termo paneles mejoradas.

En resumen, las recomendaciones para la ciudad de Concepción son:

1. Incorporación de un sistema de ventilación con recuperación de calor.
2. Transmitancia térmica de los muros $U \leq 0,35$ W/(m²K), techumbre $U \leq 0,28$ W/(m²K), radier $U \leq 0,65$ W/(m²K).
3. Ventanas termo paneles mejoradas con valores $U < 1,5$ W/(m²K) y un factor solar $g > 0,6$.
4. Incorporar elementos de sombra en verano.

4.6.4 Recomendaciones generales para el diseño de casas de baja demanda energética en 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 casi un riesgo cero de sobrecalentamiento en verano. Sin embargo, lograr una demanda energética tan baja como en Concepción, requiere en Puerto Montt un mayor esfuerzo. Esto significa, en general, como se muestra en la ilustración 4-13 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:

1. Incorporación de un sistema de ventilación con recuperación de calor.
2. Transmitancia térmica de los muros $U \leq 0,2$ W/(m²K), techumbre $U \leq 0,16$ W/(m²K), radier $U \leq 0,35$ W/(m²K).
3. Ventanas termo paneles mejoradas con valores $U < 1,5$ W/(m²K) y un factor solar $g > 0,6$.
4. Diseño arquitectónico compacto.

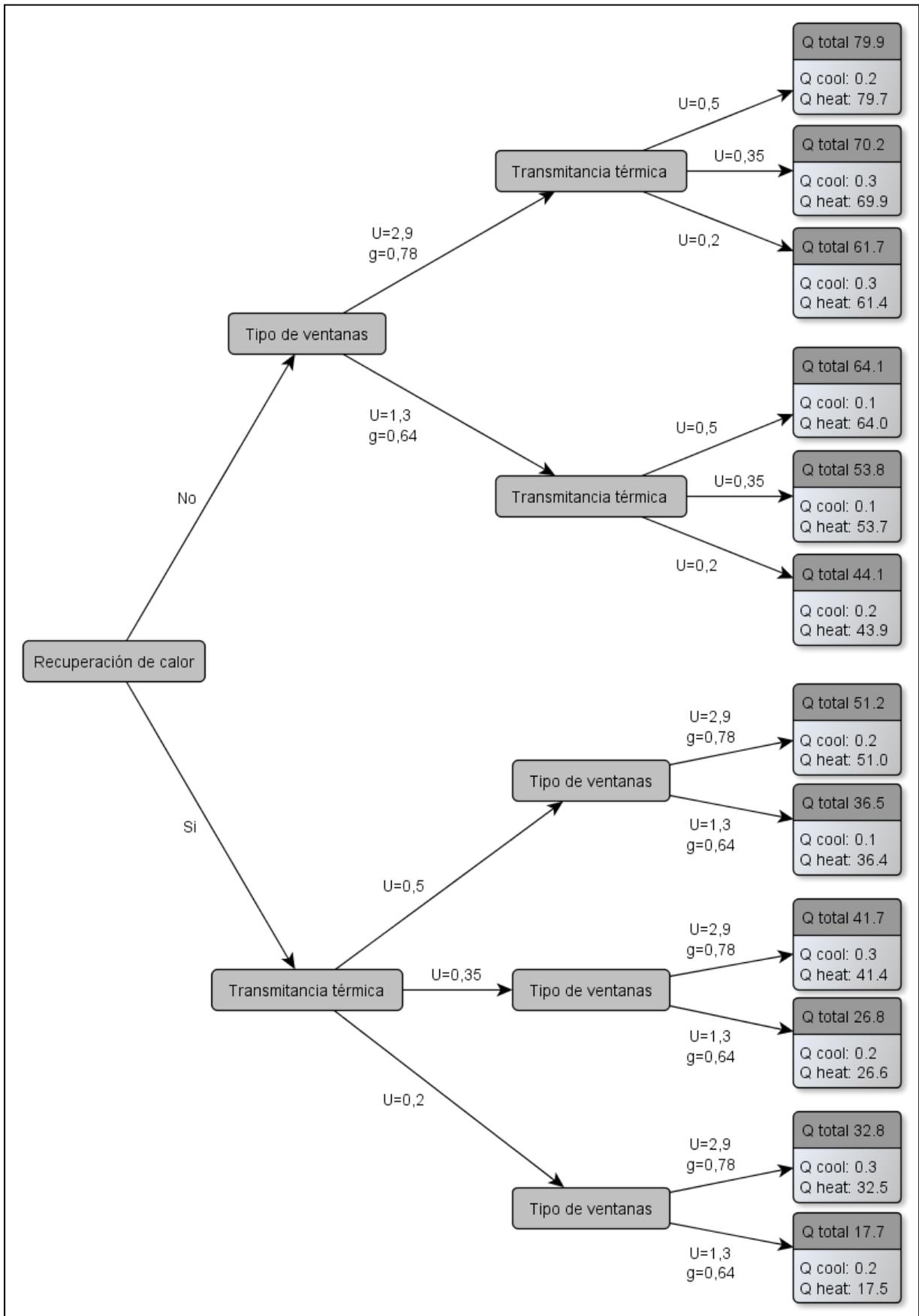


Ilustración 4-13: Árbol de decisiones para el proceso de diseño de casas de baja demanda energética en Puerto Montt con la variable de respuesta: Q total promedio [kWh/(m²a)] (elaboración propia).

CAPÍTULO
5.

MARCO TEÓRICO PARA EL ANÁLISIS DE
RENTABILIDAD DEL ESTÁNDAR
PASSIVHAUS EN CHILE

5 Marco teórico para el análisis de rentabilidad

En los capítulos anteriores, se demostró la posibilidad de construir, en el centro – sur de Chile, casas que cumplen con el estándar Passivhaus. Estas casas tienen un consumo energético en climatización, entre un 70% y un 90%, más bajo, en comparación a la reglamentación térmica vigente en Chile. Por lo tanto, para lograr esta eficiencia se debe mejorar la calidad de la construcción desde el punto de vista térmico. Por consiguiente, este mejoramiento, posee, en general, un costo de inversión inicial elevado, en comparación a una construcción tradicional.

El objetivo del presente capítulo es el análisis de rentabilidad del estándar Passivhaus en Chile, basado en el estudio multifactorial de la tesis.

5.1 Metodología del análisis de rentabilidad

5.1.1 Rentabilidad de inversiones en estándares de bajo consumo energético

Según (Feist et al., 1997) se espera por parte de algunos inversionistas que puedan invertir, en aumento en la eficiencia energética, y que dicha inversión debería tener beneficios similares a invertir en instalaciones de producción u otras formas rentables de inversión en mercado bursátil. La razón dada es que el capital disponible, debe ser invertido en medidas de mayor rendimiento. Este punto de vista no es válido, ya que se puede invertir el capital disponible, siempre en fondos de alto riesgo. Pero mientras existe un rango de crédito disponible, como en el caso de edificios existentes, en donde se opta generalmente a un crédito hipotecario – existe la disponibilidad de fondos de inversión para las tasas de interés y devolución. Si es posible utilizar estos recursos disponibles, de manera económica, en medidas de eficiencia energética del edificio, se sustituyen los gastos, que ocurrirán todos los años como los costos de operación, por los costos de los intereses y devolución. Un aumento del valor del edificio, relacionado con la medida en eficiencia energética, es un efecto secundario positivo.

“Las inversiones en eficiencia energética son siempre solamente alternativas para la adquisición de la energía”.

Una inversión en la mejora de la eficiencia energética debe compararse, por lo tanto, siempre, sólo con los gastos en energía que ocurren sin una medida de mejora. Rentable es una inversión en la eficiencia sólo, si el ahorro en gastos futuros es más alto que la adquisición de energía sin la eficiencia energética.

El óptimo económico es la combinación de medidas, la cual ofrece la satisfacción del servicio de energía, en comparación con otras alternativas con el menor costo global.

Esto es cierto, incluso si las inversiones en otras áreas logran una mayor rentabilidad, y si se considera para los gastos de capital un préstamo – generalmente un crédito hipotecario. En caso de falta de liquidez, hay un problema de financiación, pero esto no tiene relación con la rentabilidad económica.

A parte de la rentabilidad hay, además, otros criterios importantes (Kah et al., 2008) como:

- Aumento del confort (por ejemplo, un clima interior más confortable, facilidad de operación).
- Aspectos de seguridad (por ejemplo, el aumento de la seguridad del suministro energético mediante un bajísimo consumo).
- Criterios medios ambientales (por ejemplo, la reducción de las emisiones y por ende, la protección de la salud humana y los ecosistemas afectados).
- Aumentos en el valor (por ejemplo, la preservación y conservación de edificios y diseño arquitectónico).
- Impactos sociales (por ejemplo, la creación de áreas de comunicación, la mejora de las condiciones de vida).

Estas consideraciones no son fácilmente accesibles desde el punto de vista del análisis económico. En el presente estudio no se consideran estos criterios no monetarios. Existe un punto importante que aumentará su importancia en el futuro:

El aumento futuro en los gastos de energía y precios de la energía posee, en edificios muy eficientes, una importancia mucho menor que en los edificios convencionales.

Según Feist (Feist, 2006) del instituto de las casas pasivas de Darmstadt, se deben tener en cuenta las siguientes observaciones acerca de las condiciones bordes del cálculo económico: los precios de la construcción, las tasas de créditos y los subsidios pueden cambiar relativamente rápido, pero esto no afecta drásticamente la rentabilidad económica de una inversión en la eficiencia energética: ¿Por qué?

- La rentabilidad de una inversión en un edificio no depende mucho de las condiciones diarias, sino de las condiciones durante la vida útil calculada.
- En este periodo pueden ocurrir muchas cosas. Sin embargo: La tasa del crédito se puede fijar por los próximos 20 a 30 años. ¿Quién cree que los precios por energía tendrán en las próximas décadas un promedio más bajo que hoy en día? Con esto ya están relativamente fijados los parámetros más importantes.

- No se puede calcular la rentabilidad, con una exactitud alta, pero el riesgo del aumento de los precios de la energía son diferentes para una persona con un consumo energético alto, que para una persona que tiene un consumo casi nulo.
- Mientras más eficiente es la casa, menos dependiente son sus habitantes de la fluctuación de los precios de la energía.

Según (Glaumann et al., 2010) es el análisis de los costos del ciclo de vida (life cycle cost LCC) una herramienta para evaluar los costos de bienes durante el tiempo, esto significa desde la adquisición, la operación hasta la demolición. Lo cual se utiliza principalmente para evaluar opciones diversas, las cuales alcanzan los objetivos de los clientes, si estas alternativas se diferencian no sólo en el costo de la inversión inicial, sino también que en los costos de operación posterior. Principalmente para determinar el costo total del edificio durante LCC se utiliza su vida útil. Si los costos futuros de un edificio son conocidos, pueden ser utilizados para fijar, por ejemplo, el valor del arriendo del inmueble. Incluso en las adquisiciones públicas son indirectamente necesarios los cálculos del costo del ciclo de vida, dado que en los procedimientos de licitación no sólo debe ser considerado el costo del capital, sino que también el costo del ciclo de vida. Teniendo en cuenta las tendencias internacionales actuales, de la mejora de la relación precio-rendimiento para los edificios y estructuras, el LCC está ganando importancia. Hoy en día la atención se centra cada vez más, en minimizar los costos del ciclo de vida y los impactos ambientales. El LCC ofrece la posibilidad de tener en cuenta el período de amortización, durante la vida útil de varios productos de construcción y soluciones de diseño. Métodos de cálculo del LCC para edificaciones, están regidos por normas diferentes, por ejemplo en la norma internacional „ISO 15686-5:2008 - Buildings and constructed assets -- Service-life planning -- Part 5: Life Cycle Costing“; y en normas nacionales como en la norma noruega NS2454, la Richtlinie 220 „Lebenszykluskostenrechnung“ de la GEFMA (German Facility Management Association), o la norma austriaca ÖNORM B 1801-1. A pesar de algunas diferencias de enfoque, todas estas normas, dividen los costos durante el ciclo de vida de un edificio en las siguientes categorías de costos:

- Costos de inversión, construcción.
- Costos anuales en operación, consumo energético, mantención y reparación.
- Costos que no ocurren anualmente como restauración y reemplazo.
- Costos al final de la vida útil, demolición y reciclaje.

Basado en la suposición de que los precios del sector energético, tendrán un desarrollo distinto que en otros sectores, se consideran los costos de energía, a veces, por separado de los otros costos del proyecto. En un comienzo, el LCC también se puede realizar con muchos métodos de valoración de capital, tales como, la comparación de los costos-beneficios, el valor actual neto, la tasa interna de retorno o método de la anualidad. El méto-

do más adecuado y utilizado más ampliamente es el valor actual neto (VAN = valor actual neto), donde todos los flujos de caja futuros se descuentan a la actualidad y se suman. VAN es un método estándar para evaluar proyectos a largo plazo. A veces, el método VAN se simplifica para el análisis de los costos del ciclo de vida LCC, si todos los flujos de caja futuros son costos (inversiones). Los datos utilizados para la evaluación del impacto medioambiental del edificio se puede utilizar también para el análisis de los costos del ciclo de vida, sin embargo, se requiere en este caso información adicional con respecto a \$ / MJ y \$ / kg.

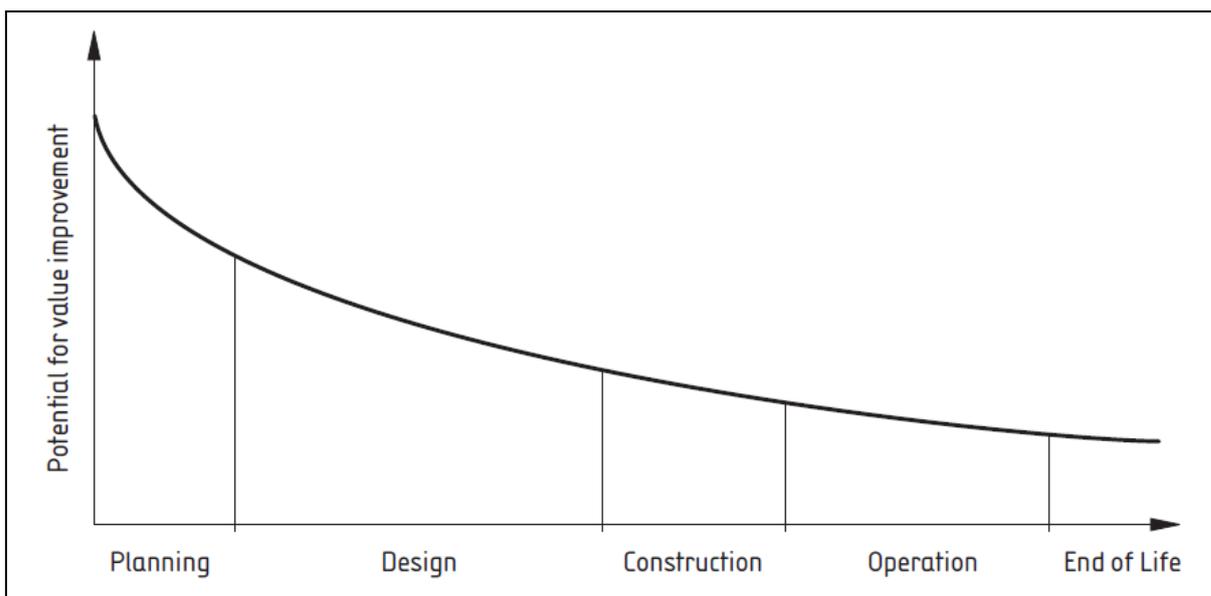


Ilustración 5-1: Alcance de la influencia sobre los costos del ciclo de vida durante el tiempo (ISO 15686-5:, 2008).

Es ampliamente reconocido, según (ISO 15686-5:, 2008) que hasta el 80% de los costos para la operación, mantenimiento y reemplazo de un edificio, influyen en el 20% inicial del proceso del diseño, como muestra la ilustración 5-1. Pero las decisiones, el control de los datos, el monitoreo continuo y la optimización de los costos del ciclo de vida, deberán continuar durante toda la vida útil del edificio. A medida que el diseño se desarrolle, se puede estimar el plan de los LCC, a partir de los planes de costos de inversión, basado en el nivel de información disponible. Los supuestos costos originales del ciclo de vida serán revisados y refinados progresivamente, o reemplazados por una mejor evaluación de cantidades, costos y rendimientos previstos de componentes alternativos, materiales y servicios, cuando el nivel de detalle del diseño avanza. También se confirmó, durante esta fase de análisis, supuestos sobre la base de cálculo, (por ejemplo, el período de análisis y la tasa de descuento a aplicar). Es importante que los análisis del LCC se desarrollen al mismo tiempo que el diseño y que estén relacionados de forma continua del nuevo plan inicial y los conflictos estén,

según corresponda, señalados y resueltos. Progresivamente, la dependencia en los costos históricos será sustituida por la confianza en los costos previstos para el proyecto.

5.1.2 Diferentes métodos para determinar la rentabilidad de una inversión

Métodos adecuados para evaluar la rentabilidad son, según (Kah, et al., 2008), basados en el costo total durante la vida útil de los edificios o instalaciones consideradas (análisis de costos del ciclo de vida, Life cycle-Cost-Analysis LCA). Sobre todo analizando edificios con vidas útiles largas, lo normal es que los costos que incurren son en momentos diferentes, por lo tanto, no deben evaluarse económicamente igual. Los métodos dinámicos implican el desfase entre ingresos y gastos en el cálculo de la rentabilidad de una inversión. La base es siempre el **método del valor actual neto (VAN)**.

Un criterio de uso común para la comparación es el **periodo de recuperación**.

En el análisis del **periodo de recuperación estático** (o relación costo / beneficio) no se consideran, ni las tasas ni los intereses. Como criterio de evaluación, el método de tiempo de recuperación estático, sobreestima - como todos los métodos estadísticos - el valor de una inversión.

El método de cálculo del **periodo de recuperación dinámico** es un proceso de evaluación de la inversión (Wikipedia), que determina el tiempo necesario para recuperar una inversión de capital, incluyendo los intereses con la tasa de descuento de los flujos de retorno. Significa simplemente, que se determina el tiempo en el que el flujo de retorno de una inversión es igual al costo de adquisición. Por lo tanto, se denomina el método de cálculo de amortización de una inversión muchas veces como cálculo pay-off. En el cálculo de amortización dinámica no es apropiado evaluar la rentabilidad, como criterio único, porque, sólo, considera como objetivo, el tiempo de la recuperación y no su valor. Por lo tanto, sólo debe usarse en combinación con otros métodos, en particular con métodos de cálculo de la rentabilidad de una inversión.

El uso amplio del "**periodo de recuperación**" como criterio de evaluación de una inversión, es reconocido como un importante obstáculo para la introducción de la toma de decisiones sostenibles. También, métodos de cálculo del periodo de recuperación dinámico no son muy adecuados como criterio en el sector de la construcción (Kah, et al., 2008):

- Se evalúa una inversión con un periodo de recuperación corto siempre positivo, independientemente de la vida útil esperada de la medida. El periodo de recuperación no cuantifica la ganancia durante la vida útil, el verdadero criterio de comparación económica.

- El período de recuperación es a menudo más alto que la vida útil: Entonces la inversión no es rentable y el capital empleado no puede ser recuperado, porque la necesidad de reemplazo ocurre antes de la recuperación. Sobre el monto de la pérdida, nuevamente, no hay ninguna expresión.
- Cuando se comparan los períodos de amortización de alternativas con diferentes vidas útiles, se obtienen resultados engañosos. Los períodos de recuperación, por lo tanto, generalmente, no son aptos para evaluar inversiones alternativas.

Alternativamente se puede utilizar, como criterio de evaluación, el **precio equivalente de energía ahorrada**. Más información sobre este método se puede encontrar en (Feist, et al., 1997) y no se detalla en el presente trabajo.

Normas y reglamentaciones: (Pelzeter, 2005) Para el análisis separado de los costos de producción y de los costos del uso de un edificio, existen los estándares DIN 276: Kosten im Hochbau, DIN 18960: Nutzungskosten im Hochbau sowie die Richtlinie GEFMA 200: „Kosten im Facility Management - Kostengliederungsstruktur zu GEFMA 100“. Se encuentra en proceso un borrador de la directiva GEFMA 220: " Lebenszykluskosten im Facility Management". Las normas internacionales vigentes dejan un margen de decisión amplio con respecto a límites del sistema, base de costos y método de cálculo. En el borrador de la norma ISO 15686-5: „Buildings and Constructed Assets – Service Life Planning – Part 5: Whole Life Costing” están incluidos contenidos de (ASTM E917 - 05, 2010) “Standard Practice for Measuring Life-Cycle Costs of Buildings and Building Systems” , NS 3454 (Noruega) “Life cycle costs for building and civil engineering work – Principles and classification” y AS/NZS 4536: “Life cycle costing - An application guide” (Australia/Nueva Zelanda).

La Parte 5 de la norma ISO 15686 (ISO 15686-5:, 2008) describe los procedimientos para la realización del análisis de los costos del ciclo de vida de los edificios y activos construidos con sus componentes. Estas evaluaciones toman en cuenta los costos o los flujos de caja, es decir, los costos relevantes (y los ingresos y externalidades si se incluyó en el formato del acuerdo) que derivan de la adquisición a través de la operación hasta la demolición. Esta evaluación típicamente incluye una comparación entre las opciones o una estimación de los costos futuros a nivel de portafolio, proyecto o componente. La evaluación es durante un período de análisis acordado y se debe dejar claro si este es menor que el ciclo de vida completo de los activos construidos. En la ilustración 5-2: esquema de los costos del ciclo de vida según (ISO 15686-5:, 2008) se ve la definición de los costos del ciclo de vida en diferentes etapas. Generalmente no se analizan los costos totales del ciclo de vida, sino los cos-

tos del ciclo de vida que tienen relación directa con la construcción, operación, mantención y demolición de la edificación.

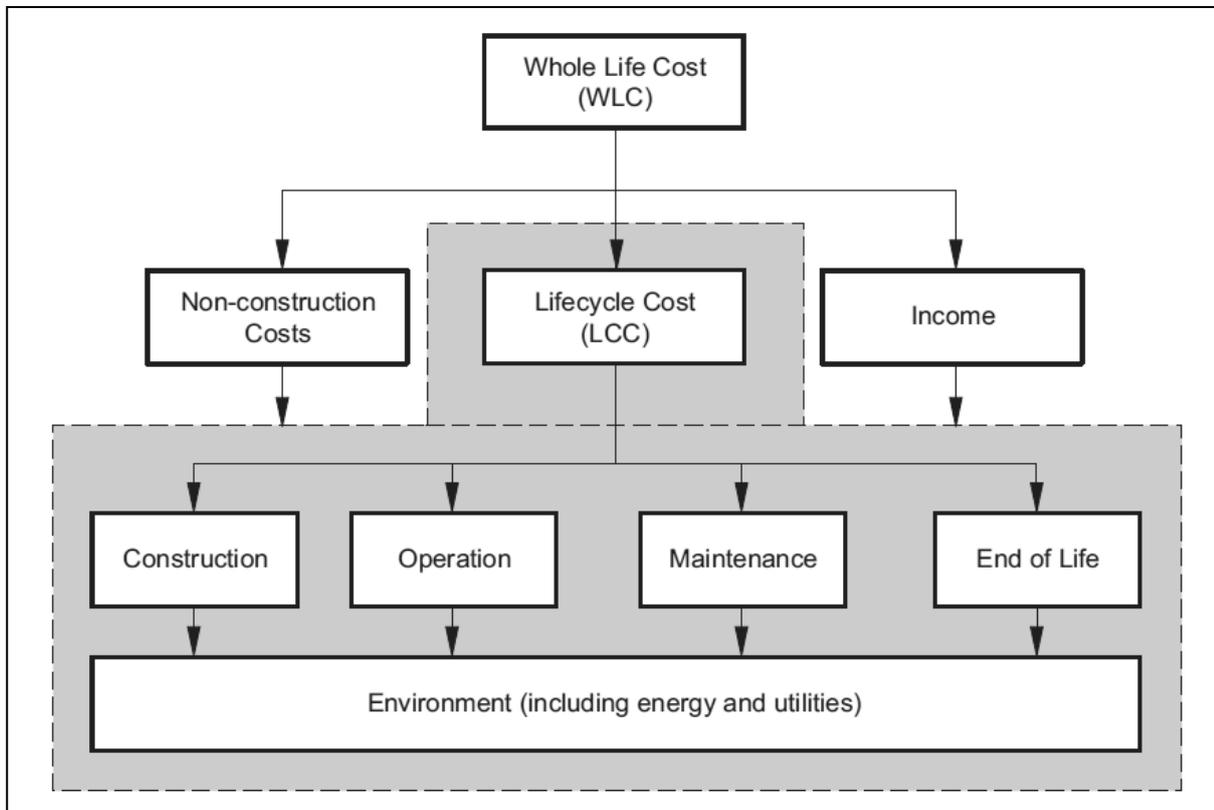


Ilustración 5-2: Esquema de los costos del ciclo de vida según (ISO 15686-5:, 2008).

Significancia e impacto del cálculo de los costos del ciclo de vida según (ASTM E917 - 05, 2010) "Standard Practice for Measuring Life-Cycle Costs of Buildings and Building Systems". LCC análisis es un método económico, para evaluar un proyecto o alternativas de proyectos durante un período de estudio designado. El método se basa, en el cálculo del LCC, para diseños alternativos de la construcción o especificaciones del sistema, que tienen el mismo objetivo y luego compararlas para determinar cuál tiene el menor costo del ciclo de vida, durante el período del estudio. El método de LCC, es particularmente adecuado, para determinar si el mayor costo inicial de un sistema de construcción o edificio, se justifica económicamente por la reducción de los costos futuros (por ejemplo, de operación, costos de mantenimiento, reparación o sustitución) cuando se compara con una alternativa que tiene un menor costo inicial, pero con mayores costos futuros. Si el diseño de un edificio o en las especificaciones del sistema tiene, en comparación con una alternativa, tanto un costo inicial más bajo y menores costos futuros, no es necesario analizar los LCC para demostrar que la primera es la opción económicamente preferible. Si un proyecto de inversión no es esencial para la operación del edificio (por ejemplo, la sustitución de las ventanas actuales de vidrio simple con nuevas ventanas de doble vidrioado hermético), el proyecto debe ser

comparado con el "no hacer nada" alternativo (es decir, manteniendo ventanas de vidrio simple) con el fin de determinar si es rentable o no. Normalmente, la alternativa de "no hacer nada" no considera ningún costo de inversión inicial, sino que considera costos más altos en el futuro que el proyecto propuesto.

Alcance del análisis de LCC (ASTM E917 - 05, 2010):

- Esta práctica establece un procedimiento para evaluar el costo del ciclo de vida (LCC) de una construcción o de un sistema constructivo y para la comparación de los LCC de diseños o sistemas alternativos que cumplan los mismos requisitos funcionales.
- El método de LCC analiza, en términos del valor presente o valor anual, la suma de todos los costos relevantes asociados con la posesión y operación de un edificio o un sistema constructivo en un período de tiempo determinado.
- La premisa básica del método de LCC es, que para que un inversionista pueda tomar decisiones, todos los costos derivados de una decisión de inversión son potencialmente importantes para esta decisión, incluyendo los costos futuros, así como, en la actualidad aplicada a los edificios o sistemas constructivos, el LCC incluye todos los costos relevantes en un período de estudio designado, incluyendo los costos de diseño, compra / alquiler, construcción / instalación, operación, mantenimiento, reparación, sustitución y demolición de un diseño o sistema.

El proceso del análisis de los costos del ciclo de vida:

- a. Los pasos generales del proceso del análisis son:
 - Definir cuidadosamente el propósito y el alcance del LCC.
 - Planificar el procedimiento.
 - Establecer las reglas y la metodología a aplicar.
 - Recopilar la información disponible y registrar los supuestos datos.
 - Realizar los cálculos y validar los resultados.
 - Aplicar análisis del riesgo y de la sensibilidad.
 - Interpretar los resultados cuidadosamente.
 - Reportar los resultados y documentar la información y los supuestos utilizados.
 - Revisar el informe con el cliente y obtener acuerdo sobre los resultados finales.
 - Hacer un análisis del LCC para realizar evaluaciones comparativas (opcional).
- b. Iteraciones del proceso pueden ser necesarias, y el nivel de los detalles, la forma del análisis y de los informes va a cambiar durante el período de adquisiciones del proyecto de construcción.

5.1.3 Método usado en el presente estudio de rentabilidad

En el presente estudio se considera sólo la diferencia en LCC entre el edificio mejorado y un edificio de referencia. No se determinan los valores absolutos de los costos de inversión, sino, sólo el valor de la diferencia entre las dos variantes. Esto significa que todos los costos que ocurren en la misma cantidad, tanto en el edificio de referencia, como en el edificio mejorado deben ser excluidos. Lo mismo se aplica a los costos de operación, mantención, reemplazo y demolición.

Se aplica el método dinámico más común según (Kah, et al., 2008) , el método del valor actual neto (VAN), cuyo objetivo es el valor presente neto de una inversión. Para determinar el valor actual neto, se descuenta cualquier pago o ingreso dentro del ciclo de vida con la tasa de interés a la fecha de referencia. De esta manera, se determina la ganancia total o la pérdida total.

El método de cálculo de la diferencia en los costos del ciclo de vida es basado en las normas descritas anteriormente. Se utiliza el método del valor presente neto. El Valor actual neto también conocido como valor actualizado neto (*inglés Net present value*), cuyo acrónimo es VAN (*inglés NPV*), es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión (Wikipedia). La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja futuros del proyecto. En el caso de inversiones en eficiencia energética de edificaciones los flujos futuros considerados son generalmente los gastos en operación, mantención y reemplazo. A este valor se le resta la inversión inicial, de tal modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto. Como, anteriormente, descrito se considera la diferencia del VAN entre caso de referencia según reglamentación térmica (RT) y casos de estudio. El proceso es explicado en la ilustración 5-3: esquema del análisis de los costos del ciclo de vida aplicado en el presente estudio según (morrissey and horne, 2011).

Se analiza adicionalmente como complemento el periodo de recuperación dinámico. De acuerdo a lo descrito anteriormente, el cálculo de amortización dinámica no es apropiado para evaluar la rentabilidad, como criterio único, porque considera como objetivo sólo el tiempo de la recuperación y no su valor. Por lo tanto, sólo debe usarse en combinación con otros métodos, en particular con métodos de cálculo de la rentabilidad de una inversión como el VAN.

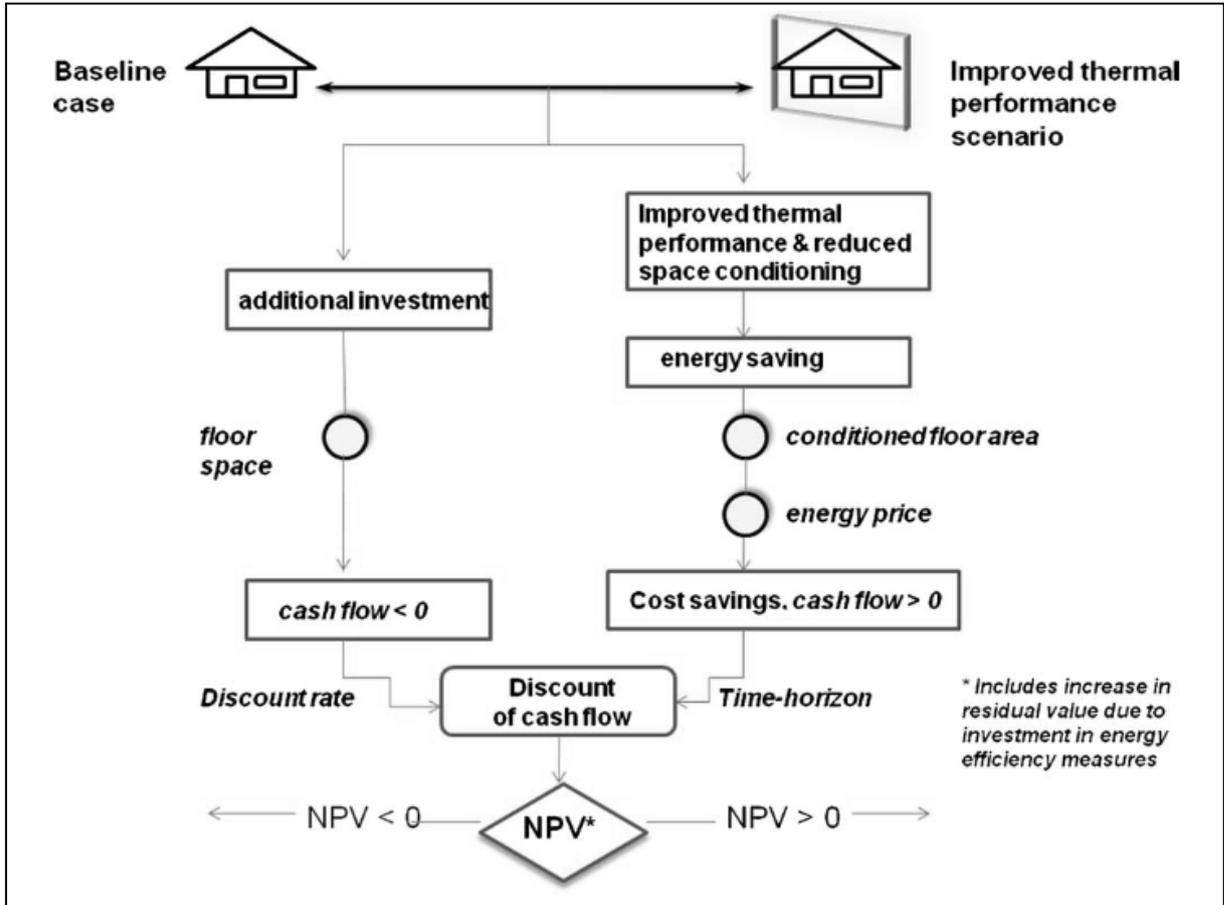


Ilustración 5-3: Esquema del análisis de los costos del ciclo de vida aplicado en el presente estudio según (Morrissey and Horne, 2011).

Tabla 5-1: Nomenclatura para el cálculo de LCC (elaboración propia).

Abreviación	Unidad	Inglés	Español
LCC	[\$ CLP]	life cycle cost	costos del ciclo de vida
IC	[\$ CLP]	initial investment cost	costos iniciales de la inversión
OC	[\$ CLP]	operating cost	costos de operación
RC	[\$ CLP]	replacement cost	costos de reemplazo
dLCC	[\$ CLP]	difference in LCC	diferencia en LCC
dIC	[\$ CLP]	difference in the initial investment cost	diferencia en costos de inversión inicial
dOC	[\$ CLP]	difference in the operating cost	diferencia en costos de operación
dRC	[\$ CLP]	difference in the replacement cost	diferencia en costos de reemplazo

RT		reference case built in accordance with the actual standard	caso de referencia construido en acuerdo a la reglamentación térmica (RT)
CP		study case, Passivhaus, Passive House	caso mejorado, caso de estudio, Casa Pasiva, Passivhaus
Q	[kWh/año]	energy demand	demanda energética
heating		heating	calefacción
cooling		cooling	refrigeración
aux		auxiliary system such as fans, pumps	sistema auxiliar como ventiladores, bombas
μ	[-]	system efficiency, performance	eficiencia del sistema, rendimiento
e_p	[\$ CLP/kWh]	energy Price	precio de energía
a	[-]	discount factor	factor de descuento
r_e	[-]	real interest rate including the effect of escalation of energy price	tasa de interés real incluyendo el efecto del aumento del precio de la energía
e	[-]	escalation in energy Price	aumento del precio de la energía
t	[años]	number of years under study	vida útil aplicado en el estudio
r	[-]	real interest rate	tasa de interés real (calculado con UF)
f	[-]	inflation rate	tasa de inflación
i	[-]	nominal interest rate	tasa de interés nominal
n	[años]	payback period	periodo de recuperación

Se calcula el costo del ciclo de vida, sin considerar los costos de demolición, dado que, después se analiza la rentabilidad con la diferencia de los LCC y se asume que la demolición del caso de estudio y del caso de referencia tendrá el mismo valor. Los costos del ciclo de vida es la suma de los costos de construcción IC, de la operación y mantención OC y del reemplazo RC. Costo del ciclo de vida, sin costos de demolición del edificio (**LCC**):

$$LCC = IC + OC + RC \quad (5.1)$$

En el presente estudio se calcula la diferencia, en los costos del ciclo de vida, para cada caso (j). Para obtener la diferencia en los costos del ciclo de vida entre el caso de estudio y

el caso de referencia, se resta los LCC del caso de referencia construido según reglamentación térmica de los LCC del caso de estudio. Diferencia en los costos del ciclo de vida para cada caso (j):

$$dLCC_j = LCC_{CP,j} - LCC_{RT,j} \quad (5.2)$$

Igualmente se puede determinar la diferencia en LCC restando, en cada grupo, el caso de referencia del caso de estudio. Los grupos son los costos de construcción IC, de la operación y mantenimiento OC y del reemplazo RC. Diferencia en los costos del ciclo de vida entre caso de estudio y caso de referencia (**dLCC**):

$$dLCC = dIC + dOC + dRC \quad (5.3)$$

La diferencia en los costos de inversión inicial se obtiene determinando la diferencia en los costos de inversión entre el caso de estudio y el caso de referencia. La diferencia en los costos de inversión (**dIC**) entre caso de estudio y caso de referencia se determina según la siguiente ecuación.

$$dIC = \sum_{j=0}^n dIC_j = \sum_{j=0}^n IC_{CP,j} - \sum_{j=0}^n IC_{RT,j} \quad (5.4)$$

La diferencia en los costos de operación durante la vida útil de la casa (**dOC**) incluyendo tasas, variaciones en la inflación y cambios en el precio de la energía se determina sumando las diferencias entre costos para refrigeración, calefacción y energía auxiliar. Los costos de mantenimiento no se consideran en el estudio según explicación posterior:

$$dOC = dOC_{cooling} + dOC_{heating} + dOC_{aux} \quad (5.5)$$

Con:

$$dOC_{cooling} = OC_{CP,cooling} - OC_{RT,cooling} \quad (5.6)$$

$$dOC_{heating} = OC_{CP,heating} - OC_{RT,heating} \quad (5.7)$$

$$dOC_{aux} = OC_{CP,aux} - OC_{RT,aux} \quad (5.8)$$

Con:

$$OC_{CP,cooling} = \frac{1}{\mu_{CP,cooling}} * Q_{CP,cooling} * e_{p,CP;cooling} * a \quad (5.9)$$

$$OC_{CP,heating} = \frac{1}{\mu_{CP,heating}} * Q_{CP,heating} * e_{p,CP,heating} * a \quad (5.10)$$

$$OC_{CP,aux} = \frac{1}{\mu_{CP,aux}} * Q_{CP,aux} * e_{p,CP,aux} * a \quad (5.11)$$

$$OC_{RT,cooling} = \frac{1}{\mu_{RT,cooling}} * Q_{RT,cooling} * e_{p,RT,cooling} * a \quad (5.12)$$

$$OC_{RT,heating} = \frac{1}{\mu_{RT,heating}} * Q_{RT,heating} * e_{p,RT,heating} * a \quad (5.13)$$

$$OC_{RT,aux} = \frac{1}{\mu_{RT,aux}} * Q_{RT,aux} * e_{p,RT,aux} * a \quad (5.14)$$

Donde Q es la demanda energética, e_p el precio de la energía utilizada, μ el factor de rendimiento del equipo utilizado y a el factor de descuento. El factor de descuento toma en cuenta el efecto de la inflación y el aumento del precio de la energía utilizada. Se calcula el factor de descuento a según (Hasan, et al., 2008):

$$a = \frac{1 - (1 + r_e)^{-t}}{r_e} \quad (5.15)$$

Donde r_e es la tasa de interés real, incluyendo el efecto del aumento del precio de la energía y t es el plazo de tiempo analizado. La tasa de interés real, incluyendo el efecto del aumento del precio de la energía r_e se calcula:

$$r_e = \frac{r - e}{1 + e} \quad (5.16)$$

Donde r es la tasa de interés real y e es el aumento del precio de la energía. La tasa de interés real r se calcula:

$$r = \frac{i - f}{1 + f} \quad (5.17)$$

Donde i es la tasa de interés nominal y f es la tasa de inflación. Como se describirá más adelante en este capítulo, en Chile se obtiene un crédito hipotecario, generalmente en UF, con una tasa de interés real. Esto significa que la tasa de inflación ya es incluida y la tasa de interés del crédito ya es la tasa real.

(dRC) es la suma de diferencias de costos de reemplazo. No se consideran costos de reemplazo en el presente estudio según explicación posterior.

Se analiza adicionalmente como complemento el **periodo de recuperación** dinámico. Como es descrito anteriormente, el cálculo de amortización dinámica, no es apropiado para evaluar la rentabilidad, como criterio único, porque considera como objetivo sólo el tiempo de la recuperación y no de su valor.

Debido a que en el estudio sólo se considerarán flujos anuales futuros del mismo monto, el periodo de recuperación puede calcularse utilizando la siguiente aproximación simplificada. En los Software MS Excel y MS Access se puede utilizar la ecuación ZZR.

$$n = \frac{\ln \frac{dOC_{anual}}{(dOC_{anual} - dIC * r_e)}}{\ln(1 + r_e)} \quad (5.18)$$

Donde n es el periodo de recuperación de la inversión inicial en años. Cuando el periodo de recuperación es inferior a la vida útil considerada, se recupera la inversión más alta y se obtiene una ganancia hasta el final de la vida útil.

5.2 Determinación de la diferencia en costos de inversión entre los casos de estudio y los casos de referencia (dIC)

5.2.1 Condiciones límites para la determinación de la diferencia en costos de construcción

Si el único objetivo según (Hasan, et al., 2008) es reducir el consumo energético en calefacción, la solución obvia sería añadir más aislamiento térmico, es decir, bajar los valores U. Sin embargo, cuando se realiza una mayor inversión en el aislamiento del edificio, habrá menos consumo de energía para la calefacción, pero existe un límite del espesor de aislamiento a partir del cual, cualquier aumento no será económicamente factible. Por lo tanto, cuando el objetivo es reducir el costo total del edificio, durante su vida útil, se debe analizar los LCC de la construcción. Los LCC son la suma del valor actual de los costos de inversión y operación de la edificación y de los sistemas de servicios, incluyendo aquellos costos relacionados con el mantenimiento y la sustitución, durante la vida útil especificada.

En la presente investigación, no se calcula el valor absoluto de de los LCC, sino la diferencia (dLCC) entre los LCC para los casos de estudio y los casos de referencia. Esto tiene la ventaja de reducir la cantidad de los datos necesarios para el cálculo de LCC a los datos que

tienen influencia en el consumo energético de una vivienda. Se determina la diferencia en los costos de inversión entre caso de estudio y caso de referencia (**dIC**):

$$dIC = \sum_{j=0}^n dIC_j = \sum_{j=0}^n IC_{CP,j} - \sum_{j=0}^n IC_{RT,j} \quad (5.4)$$

Para determinar la diferencia, en los costos de inversión, se requieren los precios unitarios de las diferentes partes de los casos estudiados. La presente investigación se realizó en el marco del proyecto FONDEF: “Desarrollo e introducción del sistema de edificación pasiva en Chile”. En este proyecto participan empresas constructoras las cuales cooperaron en la estimación de los precios unitarios de la construcción, con los cuales se realizó una vinculación de los precios parecidos a la siguiente descripción de Morrissey and Horne.

Según (Morrissey and Horne, 2011) son los datos sobre los costos en la industria de la construcción de difícil acceso para el público, debido a la naturaleza comercialmente sensible de la información. Se discute la falta de certidumbre en la industria en la identificación de problemas de coordinación y comunicación que afectan variaciones del acuerdo sobre los costos y los valores. Un proceso de triangulación en tres pasos es utilizado para levantar los datos de costos aplicados en este estudio. En el primer paso, se levantaron precios unitarios a través de bases de datos de costos de construcción. En el segundo paso, un consultor con experiencia en los precios en el ámbito local realizó un ajuste de los datos y en una tercera etapa, expertos del mercado revisaron y corrigieron los datos.

Una posibilidad para obtener precios de la construcción en Chile es la base de datos ONDAC. (ONDAC, 2012) “Ondac Chile S.A. nace el año 1978 y en estos años de existencia ha desarrollado una serie de herramientas de información on line, las cuales usan empresas de la construcción y también proveedores de ese mercado. El objetivo prioritario de esta empresa es proveer información actualizada a esos dos actores del Sector, para que aprovechen al máximo sus recursos técnicos y comerciales. Las herramientas puestas en la Red por Ondac Chile S.A. están permanentemente actualizadas. Destacan el Manual de Precios on line con precios referenciales de materiales, el cual es acompañado por un “Presupuestador” que permite hacer presupuestos de obras on line, permitiendo al usuario crear sus propias bases de datos de materiales y análisis de precios unitarios”.

No se utilizó la base de datos ONDAC, se trabajó con las empresas constructoras del proyecto FONDEF para obtener datos y precios, dado que, los sistemas constructivos utilizados en el estudio, con sus calidades térmicas altas, no son muy conocidos en Chile y no son de

uso común. La base de datos ONDAC ofrece generalmente precios de referencia para soluciones muy comunes, de uso masivo. Con las empresas se logró una estimación de los precios unitarios más detallada. Estos datos fueron revisados, como se describe en Morrissey and Horne, con expertos del mercado local de las ubicaciones estudiadas. Es muy probable que exista una diferencia en los costos de una construcción entre las tres ciudades estudiadas. Pero, por la dependencia de los precios, la fluctuación del mercado y por falta de información, sobre la estructura de los precios, no se diferencia en el cálculo de LCC entre Santiago, Concepción y Puerto Montt. Además, hay que tener en cuenta que los cálculos de la rentabilidad económica dependen de muchos factores externos, por lo tanto, siempre tienen un carácter estimativo y pueden variar entre los casos.

Se realiza el análisis de los costos del ciclo de vida en pesos chilenos incluyendo el IVA, dado que, los flujos de caja futuros son los gastos de energía que pagará el propietario en pesos chilenos y no en UF y estos gastos incluyen el IVA. Por esta razón, se realiza todo el cálculo de los costos del ciclo de vida en **pesos chilenos incluyendo el IVA**. Al final no se obtiene una gran diferencia, si se considera el IVA o no, dado que, al calcular con la diferencia de los LCC se resta el IVA por ser considerado, en el caso de referencia, igual que en el caso de estudio. Una descripción más detallada acerca de la diferencia entre el Peso chileno y la UF se describe en el capítulo: Condiciones límites de la determinación de la diferencia en costos de operación.

5.2.2 Determinación de la diferencia en costos de construcción entre los casos de estudio y los casos de referencia

Se determinó la diferencia en los costos de construcción para los siguientes componentes entre los casos de estudio y sus casos de referencia. Como se ha descrito anteriormente, sólo se consideran los elementos que influyen en la demanda energética y los que pertenecen a los parámetros variados en el estudio multifactorial. No se consideran los costos de todas las partes de la construcción que son iguales en el caso de referencia y en el caso de estudio. Fuente de los datos son, como descrito anteriormente, las empresas participantes del proyecto FONDEF (Hempel, et al., 2012). En la tabla 5-2: determinación de la influencia de los parámetros constructivos y sus niveles diferentes al precio de la construcción (elaboración propia) se muestran los diferentes parámetros variados en el estudio que pueden tener influencia en el valor de la inversión inicial según su variación en niveles diferentes.

Para detalles y montos acerca de los precios unitarios ver ANEXO C.

Tabla 5-2: Determinación de la influencia de los parámetros constructivos y sus niveles diferentes al precio de la construcción (elaboración propia).

Parámetro	Niveles	Influencia en el precio de la construcción
Ubicación	<ul style="list-style-type: none"> • Santiago • Concepción • Puerto Montt 	No considerado.
Orientación	<ul style="list-style-type: none"> • Noroeste • Norte • Nordeste 	No considerado.
Forma, Geometría	<ul style="list-style-type: none"> • Compacto • Irregular 	Se considera con el cambio de m ² de elementos constructivos como pisos, muros, entresijos y techo. Con el aumento de m ² se aumentan los costos.
Superficie vidriada este igual que oeste	<ul style="list-style-type: none"> • ~15% • ~40% 	Se considera con el cambio de m ² de las ventanas al este igual que al oeste. Con el aumento de m ² se aumentan los costos. Se resta la superficie vidriada de la superficie de los muros.
Superficie vidriada norte	<ul style="list-style-type: none"> • ~15% • ~40% • ~70% 	Se considera con el cambio de m ² de las ventanas al norte. Con el aumento de m ² se aumentan los costos. Se resta la superficie vidriada de la superficie de los muros.
Alero norte	<ul style="list-style-type: none"> • Si • No 	Se considera con la agregación o no agregación de un elemento de sombra horizontal a las ventanas norte. Se cambia el largo y así el valor en dependencia al tamaño de la ventana.
Sombra temporal este y oeste	<ul style="list-style-type: none"> • Si • No 	Se considera con la agregación o no agregación de un elemento de sombra temporal como una persiana a las ventanas este y oeste. Se cambia el tamaño y así el valor en dependencia al tamaño de la ventana.
Tipo de vidrio	<ul style="list-style-type: none"> • Según RT • U=1.3 g=0.64 • U=2.9 g=0,78 	Se considera con el cambio del tipo de la ventana. Los tipos de ventanas diferentes tienen costo distinto por m ² superficie vidriada.

Transmitancia térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Según RT • U=0.5 • U=0.35 • U=0.2 	Se considera con la agregación de aislación térmica en dependencia a la transmitancia térmica requerida en el radier, muros y techo. Más aislación tiene un costo más alto.
Inercia térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Según RT • Baja, • Alta 	Se considera con sistemas constructivos diferentes como madera, ladrillo y hormigón. Cada sistema tiene otro precio por m ² de la construcción.

5.2.3 Determinación de la diferencia en costos de los equipos de climatización entre los casos de estudio y los casos de referencia

Como costos de equipos se entiende a todos los costos de las instalaciones y equipos necesarios para climatizar los recintos interiores habilitados, incluyendo sistemas de ventilación. No se incluye equipos de agua sanitaria caliente, dado que, se asume la necesidad de estos en los casos de estudio y en los casos de referencia con el mismo valor de inversión. Los precios para los sistemas de climatización se obtienen de las empresas participantes del Proyecto FONDEF. Se hace una separación en sistemas de ventilación mecánica y sistemas de calefacción y refrigeración. Igual que en el caso de los costos de construcción, se determina al final la diferencia en los costos entre caso de estudio y caso de referencia.

Los detalles y montos considerados para los precios unitarios de los equipos de climatización ver ANEXO C.

Sistema de ventilación: En los casos de referencia no se incluyen sistemas de ventilación forzados ni un intercambiador de calor aire-subsuelo, dado que, la reglamentación térmica (Gobierno de Chile, 2011) no lo solicita y además que, en la actualidad, no se incorpora en una construcción tradicional. En los casos de estudio se incluye siempre un sistema de ventilación. En el 50% de los casos se considera un sistema con recuperación de calor y en el otro 50% un sistema de impulsión de aire. También se considera en los casos de estudio en un 50% un intercambiador de calor aire-subsuelo como esta descrito en la tabla 5-3.

Tabla 5-3: Determinación de la influencia de los parámetros de los equipos de climatización y sus niveles diferentes al precio de la construcción (elaboración propia).

Parámetro	Niveles	Influencia en el precio de la construcción
Ventilación con recuperación de calor	<ul style="list-style-type: none"> • Si • No 	Se considera en el caso de Si un sistema de ventilación con recuperación del calor y en el caso de No, un sistema de ventilación sin recuperación del calor.
Intercambiador de calor aire-subsuelo	<ul style="list-style-type: none"> • Si • No 	Se considera el costo de la instalación de un intercambiador del calor subsuelo-aire en el caso de Si.

Sistemas de climatización: Si la demanda energética en calefacción es menor a 1 kWh/(m²a), no se considera un sistema de calefacción y si la demanda energética en refrigeración es menor a 1 kWh/(m²a), tampoco se considera un sistema de aire acondicionado. Este rango de tolerancia se permite, dado que, bajo a estos niveles de demanda energética las personas pueden utilizar sin problema un calefactor eléctrico económico para garantizar el confort térmico en invierno o aceptar algunas horas de sobrecalentamiento en verano, sin invertir en un sistema de calefacción o aire acondicionado (tabla 5-4 y tabla 5-5).

Los casos de referencia cuentan con un sistema de climatización convencional, que garantiza el mismo nivel de confort interior como el equipo en los casos de estudio. Considerando el nivel económico de las viviendas de referencia, se considera una calefacción central a gas natural con radiadores en cada habitación para lograr en invierno el rango de confort deseado. Se incluye un sistema de aire acondicionado multi Split en los casos que muestran sobrecalentamiento en verano para garantizar en todos los recintos el nivel de confort deseado.

Los casos de estudio que logran ser calefaccionados con sólo el calentamiento del flujo de aire necesario del sistema de ventilación (definición del estándar Passivhaus) cuentan con un calefactor eléctrico de tubo, que es incluido en el sistema de ventilación. Los casos que no cumplen con esta propiedad, tienen que contar con un sistema de calefacción adicional, como una calefacción central, para lograr el confort interior. Se eligió la incorporación de una calefacción central a gas natural al igual que en los casos de referencia. En verano, si es posible acondicionar la casa de estudio, con sólo enfriar el caudal de aire del sistema de ventilación, (estándar Passivhaus) se incorpora en el sistema de ventilación central un equipo single Split con una potencia baja. Si este no es posible, se considera, igual que en los casos de referencia, un sistema de climatización multi Split.

Tabla 5-4: Determinación del sistema de calefacción para los casos de estudio y sus casos de referencia (elaboración propia).

	Subdivisión	Q_{heating} [kWh/m ² a]	Tipo de sistema de calefacción
Caso de estudio	Si es posible calefaccionar con el sistema de ventilación	>1	Calefacción con el sistema de ventilación con resistencia eléctrica
		<1	Ninguno
	No es posible calefaccionar con el sistema de ventilación	>1	Calefacción central a gas natural
		<1	Ninguno
Caso de referencia	No hay subdivisión	>1	Calefacción central a gas natural
		<1	Ninguno

Tabla 5-5: Determinación del sistema de refrigeración para los casos de estudio y sus casos de referencia (elaboración propia).

	Subdivisión	Q_{cooling} [kWh/m ² a]	Tipo de sistema de refrigeración
Caso de estudio	Si es posible enfriar con el sistema de ventilación	>1	Aire acondicionado equipo eficiente single-split
		<1	Ninguno
	No es posible enfriar con el sistema de ventilación	>1	Aire acondicionado equipo eficiente mult-split
		<1	Ninguno
Caso de referencia	No hay subdivisión	>1	Aire acondicionado equipo eficiente mult-split
		<1	Ninguno

5.2.4 Determinación de la diferencia en costos generales entre los casos de estudio y los casos de referencia

La construcción de una casa que cumple el estándar Passivhaus requiere, para lograr este estándar energético tan alto, un proceso del diseño y de la planificación más detallado que una casa tradicional. Algunos puntos a considerar en el cálculo del costo de la construcción que aumentan los costos generales son:

- Cálculo del consumo energético (arquitecto, ingeniero o consultor).
- Accesorio en el proceso del diseño (consultor).

- Aumento de las horas de mano de obra para solucionar detalles.
- Ensayo Blower-Door para medir la hermeticidad de la construcción.
- Certificación del proyecto.

El valor del aumento de estos costos depende mucho de la calidad del caso de referencia. Si el caso de referencia ya tiene un nivel de la calidad de diseño alto, el aumento de los costos generales para lograr el estándar Passivhaus sería menor. Si el caso de referencia tiene una calidad de diseño bajo, se requiere un esfuerzo económico mayor para lograr el estándar, lo cual se refleja en un aumento de los gastos generales. Se estima una diferencia promedio en gastos generales entre los casos de estudio y los casos de referencia de **500.000 pesos** chilenos. Este valor coincide con los valores que obtuvo Feist (Feist, et al., 1997). Se debe considerar, que este monto mayor en los costos generales bajará a futuro con el aumento de la experiencia de las empresas constructoras en la construcción de casas pasivas, dado que, se necesitarán menos horas de trabajo en los detalles constructivos.

5.3 Determinación de la diferencia en costos de operación entre los casos de estudio y los casos de referencia (dOC)

5.3.1 Condiciones límites de la determinación de la diferencia en costos de operación

Los costos de operación se refieren a los costos que ocurren generalmente cada cierto tiempo durante la vida útil de la casa. Un ejemplo típico, son los costos en energía para tener en funcionamiento la edificación como gastos en energía para calefacción, refrigeración o ventilación. Bajo este punto, se consideran igualmente costos de mantenimiento de equipos y partes de la construcción. Para calcular los costos de operación durante la vida útil de la casa, se requieren condiciones límites y los parámetros descritos en este subcapítulo. La diferencia en los costos de operación durante la vida útil de la casa (**dOC**) incluyendo tasas, variaciones en la inflación y cambios en el precio de la energía se calculan según la siguiente ecuación:

$$dOC = dOC_{cooling} + dOC_{heating} + dOC_{aux} \quad (5.5)$$

Se decidió realizar los cálculos financieros de este estudio en **pesos Chilenos incluyendo la tasa de inflación**. La meta de la evaluación es, mostrar, desde el punto de vista del cliente o futuro propietario de la casa, la rentabilidad. Sólo la persona o institución que pagará los costos de operación, durante la vida útil de la casa, puede recuperar, a través del ahorro en gastos para la operación, una inversión inicial más alta. Los gastos de operación y energía

que tienen una fluctuación durante el tiempo, se pagan generalmente, en pesos chilenos, incluyendo el IVA. También, se puede evaluar la rentabilidad desde el punto de vista de empresas inmobiliarias. La diferencia es que ellos no recuperarán la inversión más alta durante la vida útil de la casa, sino tratan de traspasar el valor inicial más alto de la edificación al cliente. En este caso, igualmente, el cliente puede recuperar la inversión inicial más alta, a través del ahorro energético. El futuro usuario pagará los costos de operación, en nuestro caso los costos en energía, en pesos chilenos incluyendo IVA. Por lo tanto, se realiza el cálculo de los costos del ciclo de vida igualmente en **pesos chilenos incluyendo IVA**. Al final, no tiene una importancia grande si se considera el IVA o no, ya que por calcular con la diferencia de los LCC se resta el IVA por ser considerado en el caso de referencia igual que en el caso de estudio.

El **IVA** es según (Servicio de Impuestos Internos de Chile (SII), 2012) “el principal impuesto al consumo que existe en Chile y grava con una tasa del 19% las ventas de bienes corporales muebles e inmuebles. En el caso de inmuebles cuando son de propiedad de una empresa constructora construidos totalmente por ella o que en parte hayan sido construidos por un tercero para ella”.

Unidad de Fomento (UF): Por razones descritas anteriormente se calculan los LCC en pesos chilenos aunque en el sector inmobiliario se realizan inversiones o créditos generalmente en Unidad de Fomento. La definición de la Unidad de Fomento (Superintendencia de Bancos e Instituciones Financieras, 2011): “La **Unidad de Fomento (UF)** es uno de los sistemas de reajustabilidad autorizados por el Banco Central de Chile al amparo de lo establecido en el número 9 del artículo 35 de su Ley Orgánica Constitucional. De acuerdo a la definición de este organismo, la UF se reajusta a partir del día diez de cada mes y hasta el día nueve del mes siguiente, en forma diaria, a la tasa promedio geométrica correspondiente a la variación que haya experimentado el Índice de Precios al Consumidor que determina el Instituto Nacional de Estadísticas o el organismo que lo reemplace, en el mes calendario inmediatamente anterior al período para el cual dicha unidad se calcule. La Unidad de Fomento tendrá un valor de \$ 5.458,97 el día 9 de enero de 1990. Esta unidad fue creada el 20 de enero de 1967, cuando comenzó a funcionar con un valor trimestral de 100 escudos y que era calculado trimestralmente. A partir de octubre de 1975 este instrumento comienza a expresarse en pesos y ese mismo año se fijó mensualmente. Todo en el ánimo de enfrentar los bruscos cambios inflacionarios con una herramienta que identificará un precio reajutable y por un período acotado”.

Se habla de una tasa de interés nominal (\$) cuando los montos acordados quedan fijos expresados en pesos chilenos. Por otro lado, se habla de una tasa de interés real (UF) cuando

dichos montos comprometidos quedan expresados en valores que mantienen el mismo poder adquisitivo. En Chile existe la Unidad de Fomento o UF, para tener una medida de riqueza que no dependa de la inflación de los precios, y que conserve, por tanto, constantemente su capacidad de consumo. En Chile, hablar de tasas de interés reales, significa expresar los montos en esta particular moneda: la UF.

Tasa anual del crédito Hipotecario: La tasa anual del crédito hipotecario se obtuvo del simulador de crédito hipotecario de la superintendencia de Bancos e Instituciones Financieras (Superintendencia de Bancos e Instituciones Financieras, 2011) con las siguientes condiciones bases (16.12.2011):

- Monto: UF 2.500 (equivale a \$55.654.350 (16.12.2011)).
- Tipo de Crédito: Cualquiera.
- Tipo de Tasa: Cualquiera.
- Plazo: 20 Años.

En el resultado están incluidos 12 bancos diferentes con tipos de créditos diferentes y diferentes tasas anuales. Para obtener una tasa más global se calculó el valor promedio. Este valor promedio de la tasa del crédito hipotecario utilizado en el estudio es de 5,13%. El valor base de 2500 UF es descrito en el capítulo 1 de la tesis. La explicación del plazo de 20 años sigue en el punto de vida útil de la vivienda. Dado que, los créditos hipotecarios se calculan a base de UF, la tasa del crédito es la tasa de interés real y no nominal. La tasa utilizada es **la tasa de interés real del crédito con un valor de 5,13%**.

Tasa de inflación: Para calcular los costos del ciclo de vida y estimar el aumento del precio de la energía, se requiere información sobre la tasa de inflación de un país. La denominación y definición precisa varía según el país. En Sudamérica se emplean las siglas INPC, que corresponden a Índice Nacional de Precios al Consumidor. **IPC** es la sigla de Índice de Precios de Consumo en Chile. El IPC es un índice en el que se cotejan los precios de un conjunto de productos - conocido como "cesta" o "canasta familiar" - en base a la Encuesta Continua de Presupuestos Familiares (ECPF), del Instituto Nacional de Estadística (INE), que una cantidad de consumidores adquiere de manera regular, en cierto intervalo de tiempo. En el estudio se usa el IPC de la edición nº 157/7 de diciembre 2011según (Instituto Nacional de Estadísticas (INE), 2011) con la variación de 12 meses. El índice publicado es **3,9%**. En la ilustración 5-4, se puede observar el IPC de Chile a largo plazo con una tendencia estable en los últimos 30 años. El IPC tiene variaciones mensuales más altas que a largo plazo, pero para el análisis de los costos del ciclo de vida se puede observar que no hubo mucho cambio en los años anteriores.

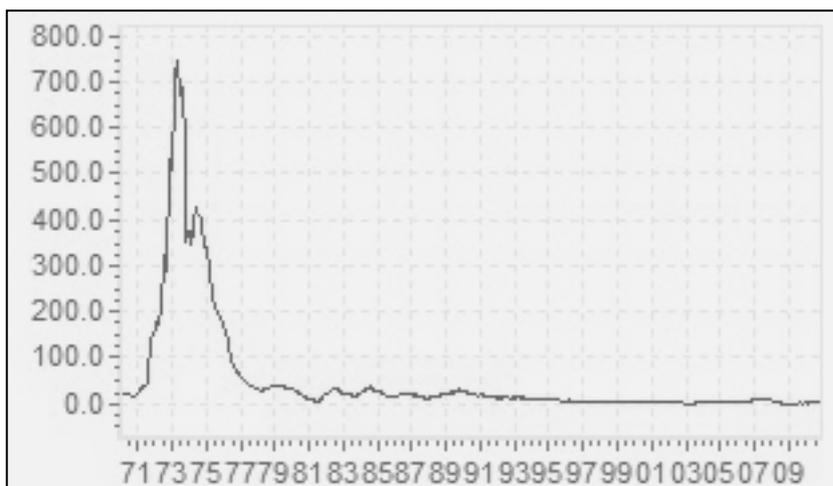


Ilustración 5-4: Grafico IPC Chile a largo plazo (fuente: <http://es.global-rates.com/estadisticas-economicas/inflacion/indice-de-precios-al-consumo/ipc/chile.aspx>).

El aumento del precio de energía: Según la (Comisión Nacional de Energía, 2012) “el consumo de energía en el mundo se incrementará en un 57% entre el 2004 y el 2030, a pesar de que se espera que el aumento de precios, tanto del petróleo como del gas natural siga en aumento. Gran parte de este incremento, será producido por el experimentado en los países con economías emergentes. En el informe "Internacional Energy Outlook 2005" se prevé que el consumo de energía en el mercado experimente un incremento medio de un 2,5% por año hasta el 2030 en los países ajenos a la OCDE, entre ellos Chile, mientras que en los países miembros será tan solo del 0,6%; así, durante este periodo, los países OCDE incrementarán su demanda energética en un 24%, mientras que el resto de países lo harán al 95%. Las economías emergentes serán, las responsables del crecimiento proyectado en el consumo de energía dentro del mercado en las dos próximas décadas.”

Este aumento del consumo energético provoca indudablemente un aumento en los precios de la energía. En el estudio de (CDT, et al., 2010) se documenta el aumento de los precios de la energía de la siguiente manera: “De acuerdo a información entregada por la Comisión Nacional de Energía, en el caso de combustibles líquidos importados, se usarán los pronósticos obtenidos de Purvin & Gertz – Sept. 2009.” En este estudio de CDT se estima el aumento de los precios de energía hasta el año 2020. Todos los tipos de energía referidos tendrán un aumento real anual entre 1% a 3% con excepción de la electricidad que mantendrá el precio promedio estable.

En el presente estudio se estima el aumento futuro con la misma tasa de aumento del pasado cercano. El aumento del precio de energía según (Instituto Nacional de Estadísticas (INE), 2011) se estima por la división 4 grupo 4 ELECTRICIDAD, GAS Y OTROS COMBUSTIBLES en base a la variación de 12 meses en la edición nº 157/7 de diciembre 2011 en 5,6%. Este refleja el aumento nominal lo cual incluye la tasa de inflación. Con una tasa de

inflación de 3,9% se puede calcular un aumento real de los precios de energía en Chile en una tasa de 1,7% anual. Aunque las fuentes de energía como electricidad, gas, petróleo o leña son diferentes y tendrán un aumento de los precios no totalmente similar, se estima un aumento promedio. Dado que los precios de energía cambian rápido y no de una manera homogénea, existe una dificultad de pronosticar los precios para los próximos 20 años. Aunque el autor estima un aumento del precio más fuerte que el considerado, se calcula en el presente estudio de una manera conservadora con un **aumento real similar al año 2011 del 1,7% anual**.

El precio de energía tiene una variación por región en el país. En este estudio se utilizan los precios de energía obtenidos de: “Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial” (CDT, et al., 2010). La tabla a continuación es un resumen de los costos energéticos para los diferentes tipos de energía que se consumen en el sector residencial en Chile y para las diferentes zonas térmicas. Estos valores se calcularon en base a los precios de la energía para cliente final, que se obtuvieron al momento de realizar la encuesta del estudio de CDT, es decir, diciembre del 2009.

Tabla 5-6: Precios de energía estimados según (CDT et al., 2010) por agrupación de zonas térmicas.

	Electricidad	Gas Licuado	Kerosene	Gas Natural	Diesel	Leña seca	Leña húmeda	Carbón
Zonas	[UF /MWh]	[UF /MWh]	[UF /MWh]	[UF /MWh]	[UF /MWh]	[UF /MWh]	[UF /MWh]	[UF /MWh]
Todo el País	5,90	3,00	2,20	4,10	2,00	0,87	1,07	1,90
1,2	6,70	3,20	2,40	3,40	2,00	0,93	1,14	1,90
3,4,5	5,70	3,00	2,20	4,30	2,00	0,86	1,06	1,90
6,7	6,20	3,20	2,20	0,50	2,10	0,88	1,08	1,90

De acuerdo a lo descrito anteriormente, se pudo inferir que aumentaron los precios de la energía durante los últimos dos años desde el levantamiento de los datos de CDT. En el presente estudio se calculan los precios de energía en pesos chilenos. Se considera el valor del UF de la fecha del 16.12.2011 en 1UF=22.255.- pesos. Con la conversión de los precios de energía de 2009 obtenido en UF al Peso Chileno de 2011, se incluye el efecto de inflación durante los dos años. No se considera un aumento del precio de la energía.

Tabla 5-7: Precios de energía estimados según (CDT et al., 2010) por agrupación de zonas térmicas con la conversión entre UF y pesos Chilenos con el curso de 16.12.2011 (elaboración propia).

	Electricidad	Gas Licuado	Kerosene	Gas Natural	Diesel	Leña seca	Leña húmeda	Carbón
Zonas	[Pesos /kWh]							
Todo el País	131,3	66,8	49,0	91,2	44,5	19,4	23,8	42,3
1,2	149,1	71,2	53,4	75,7	44,5	20,7	25,4	42,3
3,4,5	126,9	66,8	49,0	95,7	44,5	19,1	23,6	42,3
6,7	138,0	71,2	49,0	11,1	46,7	19,6	24,0	42,3

Se evalúa la rentabilidad de casas pasivas en las ciudades Santiago, Concepción y Puerto Montt las cuales pertenecen a las zonas térmicas 3, 4 y 6. Para bajar la complejidad del análisis de LCC se considera para las tres ciudades el mismo nivel de precio de la energía. Se calcula el valor promedio según peso entre las zonas térmicas 3, 4, 5, 6 y 7. En el caso de gas natural se considera el valor de las zonas 3, 4,5 dado que el bajo valor de las zonas 6, 7 corresponde sólo a la zona 7 que no es objeto del presente estudio. Estos valores son similares a los valores corregidos de (CDT, et al., 2010) para todo el país.

Tabla 5-8: Precios de energía utilizados en el presente estudio en pesos/kWh según (CDT et al., 2010) (elaboración propia).

	Electricidad	Gas Licuado	Kerosene	Gas Natural	Diesel	Leña seca	Leña húmeda	Carbón
	[Pesos /kWh]							
Valor utilizado	132,4	69,0	49,0	95,7	45,6	19,4	23,8	42,3

Vida útil para el análisis de los costos del ciclo de vida: Para analizar los costos del ciclo de vida se tiene que definir la duración del ciclo, significa la vida útil a considerar. Se puede considerar la vida útil del material y de la construcción o la vida útil económica: Por una parte existe la vida útil de los materiales y de la construcción que puede tener una duración hasta 100 años y por otra parte existe la vida útil según criterios económicos que generalmente, considera un plazo más corto. Para el análisis del ciclo de vida de construcciones no existe al momento de la redacción un documento oficial en Chile que determina la vida útil de diferentes tipos de construcciones, pero sí existen criterios de valoración y de tasaciones

Capítulo 5.

de bienes inmuebles. Un criterio para estimar la vida útil de una casa se puede obtener de una resolución exenta sobre la vida útil fijada por el Servicio de Impuestos Internos para bienes físicos del activo inmovilizado (Servicio de Impuestos Internos, 2003).

Según (OLATE, 2008) es la tasación tributaria la tasación que efectúa el SII y está destinada a buscar un valor estándar para propiedades similares y así poder aplicar un impuesto territorial justo a los bienes raíces de semejantes características y localizaciones.

Tabla 5-9: Vida útil normal de construcciones y casas en ladrillo, hormigón y madera (Servicio de Impuestos Internos, 2003).

Nómina de bienes según actividades	Nueva vida útil normal	Depreciación acelerada
Edificios, casas y otras construcciones, con muros de ladrillos o de hormigón, con cadenas, pilares y vigas hormigón armado, con o sin losas.	50 Años	16 Años
Construcciones de adobe o madera en general.	30 Años	10 Años

Olate nombra en su manual de tasación de bienes raíces: urbanos - rurales - agrícolas otros valores de la vida útil de la construcción según su tipo de estructura (OLATE, 2008). Estos valores son en general más altos que los valores del Servicio de Impuestos Internos.

Tabla 5-10: Vida útil de tipos de estructura en Chile según (OLATE, 2008).

Tipo de Estructura	Vida Útil
Hormigón Armado	80 Años
Albañilería Reforzada	70 Años
Albañilería Armada	70 Años
Madera Impregnada (durabilidad 1)	40 Años
Madera Impregnada (durabilidad 2-3)	20 Años
Acero con Albañilería	70 Años
Adobe	40 Años

En la literatura internacional de cálculos de la rentabilidad de casas pasivas del instituto de casas pasivas de Darmstadt (Feist, 2006; Feist, et al., 1997) se aplica una vida útil para cálculos económicos de 30 años.

(Kah, et al., 2008) considera una vida útil para la evaluación de la rentabilidad de no más de 20 años. Según él, con un tiempo más largo se aumentan las inseguridades en la estimación sobre el curso de los precios de energía y las tasas del crédito. La duración de créditos hipo-

tecarios comunes son 20 años, mientras que la vida útil de la construcción y de componentes puede tener una duración más larga. En los cálculos de la rentabilidad económica de las medidas de ahorro de energía se fija generalmente un periodo de 20 años. En este plazo existe una cierta seguridad sobre la variación del precio de la energía y de las tasas de los créditos. Si se utiliza la construcción sobre este plazo, se puede considerar un valor residual para la evaluación de la rentabilidad.

Se considera en el presente estudio una vida útil para los cálculos financieros de 20 años. Construcciones y casas muestran según (OLATE, 2008; Servicio de Impuestos Internos, 2003) una vida útil elevada a los 20 años y también la vida útil según (Feist, 2006; Feist, et al., 1997) es mayor que 20 años. Considerando los puntos anteriores se formula la siguiente argumentación:

- La tasa del crédito hipotecario obtenido anteriormente se refiere a una duración del crédito de 20 años que es una duración promedio de un crédito hipotecario en Chile. Como se ha descrito anteriormente se realiza la evaluación económica desde el punto de vista del cliente o futuro propietario de la casa, por lo tanto, se deben recuperar los costos de inversión en la eficiencia energética durante el plazo del crédito. Así el cliente puede pagar con el ahorro en gastos energéticos la diferencia de la cuota mensual del crédito.
- La vida útil de una inversión en ahorro energético no coincide necesariamente con la vida útil general de una edificación, ni con la vida útil para la tasación según (Servicio de Impuestos Internos, 2003). Generalmente hay un cambio de uso durante la vida útil que significa, en muchos casos, un reacondicionamiento que incluye en mejoramiento en eficiencia energética. Por lo tanto, se debe recuperar la inversión inicial más alta antes del cambio del uso de una edificación. Se estima este plazo con 20 años.
- En el presente estudio no se considera el cambio de componentes durante la vida útil. Algunos de los componentes utilizados como ventanas, puertas o sistemas de climatización tienen una vida útil máxima de 20 años. Por lo tanto hay que cambiar estas partes después de 20 años y se deberá recuperar la inversión inicial de estas piezas durante los 20 años para ser rentable.
- Como se menciona en (Kah, et al., 2008) se aumenta la incertidumbre del pronóstico de precios de energía y de tasas de créditos cuando se alarga el periodo, por lo tanto, es mejor calcular con plazos más cortos.
- Si el cliente sigue con el uso de la vivienda después del plazo calculado de 20 años y si la inversión inicial más alta se recuperó dentro de este plazo, tendrá después la ventaja de tener, en comparación a una vivienda tradicional, un ahorro mensual en

gastos. Del punto de vista del cálculo de la rentabilidad económica se habla de ganancias.

- Se considera que el plazo de 20 años utilizado en el estudio es conservador. Con este plazo relativamente corto se minimiza el riesgo del cliente por cambios inesperados en el precio de energía y de las tasas de crédito.

La tabla 5-11, muestra el resumen de las condiciones borde para los cálculos de la rentabilidad descrita anteriormente.

Tabla 5-11: Resumen de las condiciones bordes para los cálculos de la rentabilidad (elaboración propia).

Condición borde	Abreviación	Valor
Vida útil económico	t	20 años
Tasa de interés real del crédito	r _e	5,13% anual
Tasa de inflación IPC	f	3,9% anual
Aumento precio energía real	e	1,7% anual
Factor de descuento	a	14,38

5.3.2 Determinación de la diferencia en costos de operación en energía para refrigeración y calefacción entre los casos de estudio y los casos de referencia

Para determinar la diferencia en costos de energía para refrigeración y calefacción entre los casos de estudio y los casos de referencia con las ecuaciones descritas anteriormente, se requiere información adicional tales como tipo y rendimiento de los equipos deseados, para convertir la demanda energética en consumo energético. El tipo de sistema es importante para saber la fuente de energía con su precio correspondiente. Después de la determinación de los costos de energía, para los casos de estudio y los casos de referencia, se calcula el valor neto actual de la diferencia entre los dos durante la vida útil de la casa.

$$dOC_{cooling} = OC_{CP,cooling} - OC_{RT,cooling} \tag{5.6}$$

$$dOC_{heating} = OC_{CP,heating} - OC_{RT,heating} \tag{5.7}$$

Con:

$$OC_j = \frac{1}{\mu_j} * Q_j * e_{p,j} * a \tag{5.19}$$

Rendimiento de equipos μ : Uno de los resultados de las simulaciones térmicas, es la demanda energética en refrigeración y calefacción de un edificio. La demanda energética no es lo mismo que el consumo energético. Por consiguiente, para calcular la cantidad de energía necesaria y los gastos, se requiere el valor del consumo energético. La demanda energética es la cantidad de energía que el sistema debe suministrar a un espacio / edificio para mantener las condiciones de confort. El consumo, es la cantidad de energía que se debe suministrar al sistema para que este atienda a la demanda. Dado que los sistemas tienen pérdidas, el consumo generalmente es superior a la demanda. Para calcular el consumo a partir de la demanda se requiere el factor de rendimiento de los equipos e instalaciones utilizadas.

En la ilustración 5-5, se da a conocer según (Hernández and Meza, 2011) la relación entre la demanda energética y el consumo energético para calcular el costo de la operación.

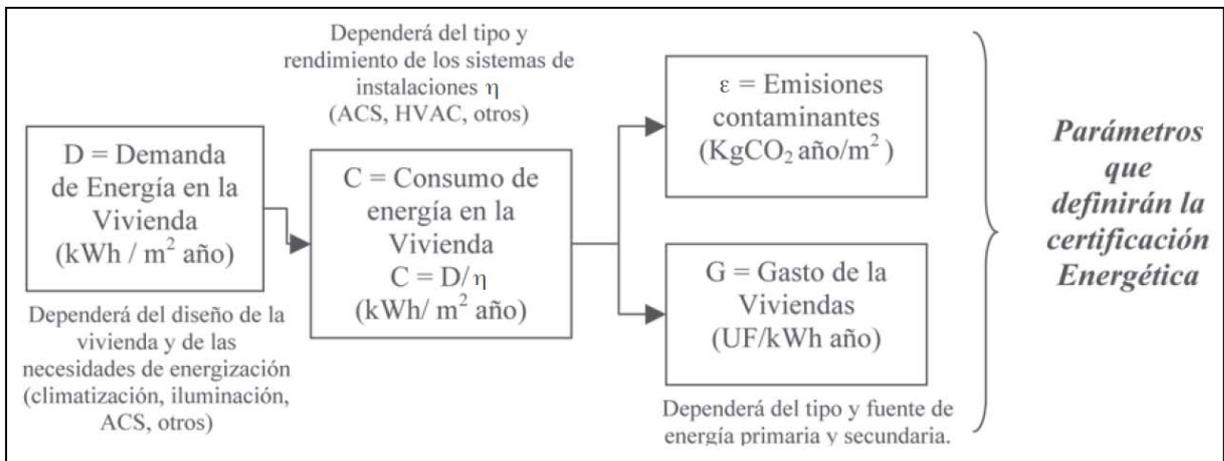


Ilustración 5-5: Parámetros que definen las certificaciones energéticas y relación entre demanda energética y consumo energético. Fuente (Hernández and Meza, 2011).

Los factores de rendimiento se pueden obtener por ejemplo de la norma alemana (DIN V 4701-10:, 2003) “Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung”. Para la certificación energética de edificaciones en Alemania (EnEV2009, 2008) se estiman los valores de conversión de la demanda en el consumo según norma mencionada. Esta estimación requiere información detallada acerca del sistema de calefacción y la red de distribución utilizada. Dado, el carácter global del estudio paramétrico, no existe en el presente estudio un diseño detallado de los sistemas de climatización y de la red de la distribución. No se pueden determinar los factores exactos, por lo tanto, se estima el rendimiento de los equipos. A continuación, en la tabla 5-12, se muestran los valores de rendimiento estimado que incluyen el rendimiento de los equipos, y los casos que tienen la fuente de información CDT incluyen adicionalmente las pérdidas por distribución y control del sistema.

Tabla 5-12: Rendimiento de diferentes equipos (elaboración propia).

Equipo	Fuente	Rendimiento
Estufa a gas abierta (mitad con termostato, mitad sin termostato)	(CDT, et al., 2010)	0,90
Estufa a gas con chimenea (mitad con termostato, mitad sin termostato)	(CDT, et al., 2010)	0,67
Chimenea a leña sin termostato	(CDT, et al., 2010)	0,13
Cocina a leña sin termostato	(CDT, et al., 2010)	0,43
Calefactor a leña convencional actual sin termostato	(CDT, et al., 2010)	0,64
Salamandra a leña sin termostato	(CDT, et al., 2010)	0,34
Estufa a parafina (mitad con termostato, mitad sin termostato)	(CDT, et al., 2010)	0,90
Estufa eléctrica (mitad con termostato, mitad sin termostato)	(CDT, et al., 2010)	0,95
Caldera de condensación (calefacción central) gas natural o gas licuado	(CDT, et al., 2010)	0,96
Caldera con biomasa (calefacción central)	(CDT, et al., 2010)	0,73
Caldera a gas natural o gas licuado (calefacción central)	(Rolf Gloor, 2010)	0,75
Caldera a kerosene (calefacción central)	(Rolf Gloor, 2010)	0,75
Energía auxiliar Q_{aux} (ventiladores, bombas)	Elaboración propia	1,00
Resistencia eléctrica (calentador del aire)	(Rolf Gloor, 2010)	0,95
Aire acondicionado equipo eficiente mult-split (eléctrico) (ESEER)	(Saheb et al., 2006)	3,50

El rendimiento de los equipos auxiliares, tales como ventiladores o bombas, se denomina en la tabla 5-12 con el factor 1,0. Se determina según (DIN V 4701-10:, 2003) el consumo y no la demanda de estos equipos incluyendo el rendimiento.

En el ámbito internacional existen diferencias en la definición del rendimiento de equipos con bombas de calor, como equipos de aire acondicionado. A continuación se hará referencia a las definiciones más comunes:

- Factor de eficiencia energética (EER): proporción entre la producción de frío y el consumo de electricidad respecto a una fuente y una temperatura de salida especificadas.

- Coeficiente de rendimiento (COP): proporción entre la producción de calor y el consumo de electricidad respecto a una fuente y una temperatura de salida especificadas.
- (ESEER): "European Seasonal Energy Efficiency Ratio" es el coeficiente de eficiencia energética estacional de la Unión Europea. Este parámetro se utiliza para calcular el rendimiento energético de una enfriadora o bomba de calor, teniendo en cuenta las cargas variables de la máquina durante todo el año.
- Integrated Part Load Value (IPLV): Parecido al ESEER pero utilizado en los Estados Unidos y definido por Air-Conditioning, Heating and Refrigeration Institute (AHRI). Este parámetro se utiliza para calcular el rendimiento energético de una enfriadora o bomba de calor, teniendo en cuenta las cargas variables de la máquina durante todo el año.

Se utiliza en el presente estudio el ESEER para estimar el rendimiento del equipo de enfriamiento, teniendo en cuenta la variación durante el año. Equipos energéticamente eficientes tienen un IPLV o ESERR alrededor de 3 a 4, lo que significa que producen por cada kWh electricidad consumida 3 a 4 kWh energía para enfriamiento. En el presente estudio se utiliza un ESEER de 3,5 que representa un equipo eficiente común en el mercado.

Tipos de sistemas de climatización implicados: El presente estudio está basado en simulaciones térmicas multifactoriales de los casos de estudio con sus casos de referencia asociados. Se analizó un total de más de 21.000 casos de estudio, con sus casos de referencia según Reglamentación térmica RT (Ministerio de Vivienda y Urbanismo and Gobierno de Chile, 2011). En los casos de estudio se analizó, que es posible climatizar el interior sólo con calentar o refrigerar el caudal de aire fresco, el cual se debe impulsar para garantizar condiciones de higiene, y así lograr el estándar Passivhaus según (Krick, et al., 2011). Todos los casos de estudio que lograron el estándar Passivhaus, pueden ser climatizados a través del sistema de ventilación. Los casos que no lograron el estándar deben tener un sistema de climatización adicional, para garantizar condiciones de confort interior. En los casos de referencia, que cumplen con la RT, se instalan sistemas de climatización para garantizar las condiciones de confort.

Si la demanda energética en calefacción, en los casos de estudio y de referencia, es menor a 1 kWh/(m²año) no se considera un sistema de calefacción. Si la demanda energética en refrigeración es menor a 1 kWh/(m²año) no se considera un sistema de aire acondicionado. Este rango de tolerancia se permite, dado que, bajo de este nivel de la demanda energética, las personas pueden utilizar, sin problema, un calefactor eléctrico económico, para garantizar el confort térmico en invierno o aceptar algunas horas de sobrecalentamiento en verano,

sin una inversión alta en un sistema de calefacción o aire acondicionado (tabla 5-4 y tabla 5-5).

- Los casos de referencia cuentan con un sistema de climatización convencional que garantiza un nivel de confort interior deseado, al igual que los equipos de las casas de estudio. Por clase y tipos de las viviendas descritas en el capítulo 1, se considera una calefacción central a gas natural con radiadores en cada habitación. Los casos que muestran sobrecalentamiento en verano cuentan con un sistema de aire acondicionado multi-Split que garantiza un nivel de confort interior en toda la casa.
- Los casos de estudio que logran ser calefaccionados con el precalentamiento del flujo de aire del sistema de ventilación (definición del estándar Passivhaus) cuentan con un calefactor de aire eléctrico el cual es ya incluido en el sistema de ventilación. Los casos que no logran el confort interior con este precalentamiento tienen que incluir un sistema de calefacción adicional o una calefacción central. Se eligió la incorporación de una calefacción central a gas natural, igual que los casos de referencia. La misma situación ocurre en verano. Si es posible acondicionar la casa de estudio con el pre enfriamiento del caudal de aire del sistema de ventilación (estándar Passivhaus), se incorpora un equipo single Split, con una potencia mínima, en el sistema de ventilación central. Si no es posible se considera, igual que en los casos de referencia, un sistema de climatización multi-Split para lograr el confort interior deseado.

La tabla 5-13, muestra los equipos de climatización para diferentes configuraciones de las casas con rendimiento y precio de energía utilizados en el estudio.

Tabla 5-13: Equipos de climatización para diferentes configuraciones de las casas con rendimiento y precio de energía (elaboración propia).

Equipo	Rendimiento	Tipo de energía	Precio energía
[-]	[-]	[-]	[Pesos/kWh]
Equipos auxiliares (Ventiladores, bombas)	1,00	Eléctrica	132,4
Calefactor de aire eléctrico Passivhaus	0,95	Eléctrica	132,4
Calefacción adicional Passivhaus y caso de referencia	0,75	Gas Natural	95,7
Aire acondicionado Passivhaus single-split	3,50	Eléctrica	132,4
Aire acondicionado Passivhaus y caso de referencia multi-split	3,50	Eléctrica	132,4

5.3.3 Determinación de la diferencia en costos de operación de energía auxiliar entre los casos de estudio y los casos de referencia

La energía auxiliar es la energía adicional que requieren los equipos de climatización a parte de la energía para satisfacer la demanda energética determinada para garantizar el confort térmico. Por ejemplo, una calefacción central a gas natural requiere, a parte del gas natural, electricidad para la operación de las bombas, sensores y del control. Dado que, los casos de estudio y los casos de referencia tienen sistemas de climatización diferentes, tendrán costos de operación diferentes. Por lo tanto hay que determinar la diferencia en los costos de operación para la energía auxiliar dOC_{aux} para los sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado.

$$dOC_{aux} = OC_{CP, aux} - OC_{RT, aux} \quad (5.8)$$

Energía auxiliar del sistema de ventilación para los casos de estudio: Determinación de la energía auxiliar $Q_{CP,aux}$ para el sistema de ventilación para los casos de estudio: Según capítulos anteriores, se calcula con un caudal de aire de $30m^3/persona$ y hora y con 4,5 personas en la casa. Con esto se obtiene un Volumen de aire que tiene que intercambiar el sistema de ventilación de:

$$V_{aire}=30m^3/(pers*h) * 4,545 pers = 136,4 m^3/h \quad (5.20)$$

En la ilustración 5-6, se muestra un esquema de un sistema de ventilación con recuperación de calor e intercambiador de calor suelo-aire para una vivienda unifamiliar según (Feist, et al., 2005).

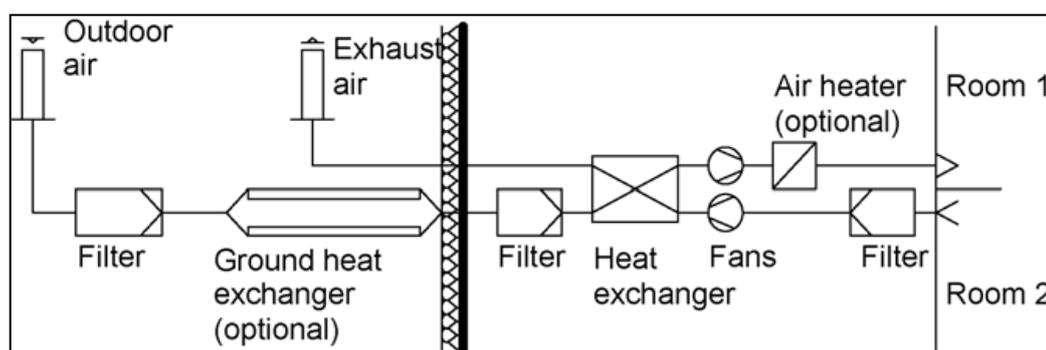


Ilustración 5-6: Sistema de ventilación con calefactor de aire para una vivienda unifamiliar (Feist, et al., 2005).

Sistemas de ventilación con recuperación de calor para casas pasivas deben tener según (Feist, et al., 2007) un consumo máximo de energía eléctrica de $0,45 Wh/m^3$ en invierno y un consumo máximo de $0,25 Wh/m^3$ en verano con el bypass del intercambiador de calor activado. En verano, con bypass, el consumo de los ventiladores es más bajo, dado que, las

pérdidas de presión internas igualmente son más bajas. Se estima que el sistema funciona durante el verano en modo bypass y durante el invierno con intercambiador de calor. De acuerdo a estas condiciones bordes se determina el consumo de energía auxiliar del sistema de ventilación con recuperación de calor:

$$Q_{aux,RDC,si} = 136,4 \text{ m}^3/\text{h} * 24\text{h}/\text{d} * 365\text{d}/\text{a} * (0,45 \text{ Wh}/\text{m}^3 + 0,25 \text{ Wh}/\text{m}^3)/2 = 418202 \text{ Wh}/\text{a} = 418,2 \text{ kWh}/\text{a} \quad (5.21)$$

Se considera en todos los casos de estudio un sistema de ventilación forzado, para garantizar la calidad de aire. En la mitad de los casos se considera un sistema de ventilación con recuperación de calor y en la otra mitad un sistema de ventilación sin recuperación de calor. En el caso que no se considera recuperación de calor se cuenta con un sistema de extracción de aire, que funciona constantemente durante el año. Un sistema de extracción con ventiladores eficientes de tecnología DC debe tener un consumo máximo de energía eléctrica de 0,25 Wh/m³ según (DIN V 4701-10:, 2003). Se determina el consumo para la ventilación forzada sin recuperación de calor en:

$$Q_{aux,RDC,no} = 136,4 \text{ m}^3/\text{h} * 24\text{h}/\text{d} * 365\text{d}/\text{a} * 0,25 \text{ Wh}/\text{m}^3 = 298716 \text{ Wh}/\text{a} = 298,7 \text{ kWh}/\text{a} \quad (5.22)$$

Un intercambiador de calor suelo-aire, no cuenta generalmente con un ventilador propio. Pero sí, el intercambiador de calor tierra-aire significa un aumento de pérdidas de presión en el sistema de ventilación y por lo tanto, se aumenta el consumo energético de los ventiladores que deben superar esta diferencia en la presión. Se estima un aumento del consumo energético de los ventiladores de 0,20 Wh/(m³ de aire). Se determina el aumento en la energía auxiliar de los casos que cuentan con un intercambiador de calor subsuelo-aire en:

$$Q_{aux,ICTA,si} = 136,4 \text{ m}^3/\text{h} * 24\text{h}/\text{d} * 365\text{d}/\text{a} * 0,20 \text{ Wh}/\text{m}^3 = 238972 \text{ Wh}/\text{a} = 238,9 \text{ kWh}/\text{a} \quad (5.23)$$

En los casos de estudio existen varias combinaciones de los sistemas de ventilación, por una parte con o sin recuperador de calor y por otra parte con o sin el intercambiador de calor tierra-aire. Estas combinaciones se resumen en la tabla 5-14.

Tabla 5-14: Resumen del consumo de energía auxiliar del sistema de ventilación y del intercambiador de calor tierra-aire para los casos de estudio (elaboración propia).

Recuperación de calor (RDC)	Intercambiador de calor tierra-aire (ICTA)	Q _{aux,RDC} [kWh/a]	Q _{aux,ICTA} [kWh/a]	Q _{CP,aux} [kWh/a]
si	si	418,2	238,9	657,1
si	no	418,2	0	418,2
no	si	298,7	238,9	537,6
no	no	298,7	0	298,7

Energía auxiliar del sistema de calefacción central: Los casos de referencia con la configuración de la envolvente según reglamentación térmica RT cuentan con una calefacción central a gas con una red de distribución y radiadores de agua caliente. Una calefacción central tiene, a parte del consumo energético para satisfacer la demanda energética, un consumo de energía auxiliar para las bombas de distribución del agua caliente y para los sistemas de control.

Según (Ebert and Bohnenschäfer, 2008) se estima la energía auxiliar de una calefacción central a gas natural con radiadores en 0,72 kWh/(m²a) para la producción y de 1,66 kWh/(m²a) para la distribución. Con una superficie útil de aprox. 90 m² se obtiene un consumo de energía eléctrica auxiliar del sistema de calefacción:

$$Q_{RT,aux} = (0.72 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) + 1.66 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})) * 90 \text{ m}^2 = 214.2 \text{ kWh/a} \quad (5.24)$$

Si un caso de estudio no logra el estándar Passivhaus, no es posible calefaccionar este caso con el precalentamiento del caudal de aire del sistema de ventilación. En este caso se considera, como descrito anteriormente, un sistema de calefacción central adicional. Por lo tanto, se suma la energía auxiliar del sistema adicional a la energía auxiliar del sistema de ventilación. El valor Q_{aux} para este sistema adicional es el mismo que en el caso de referencia que cuenta con una calefacción central.

Energía auxiliar del sistema de aire acondicionado: No se considera como energía adicional, dado que ya está incluido en el factor de rendimiento del equipo.

5.3.4 Determinación de la diferencia en costos de operación en mantención entre los casos de estudio y los casos de referencia

Los costos de mantención son costos relacionados a equipos instalados o partes de la construcción como sistemas de climatización o ventanas. Se requiere la mantención para garantizar el funcionamiento óptimo de partes de la construcción durante la vida útil de la casa. En el presente estudio se usa el análisis de las diferencias de costos entre un caso de estudio y su caso de referencia. Los dos cuentan con sistemas de climatización, con ventanas y puertas y con elementos expuestos al exterior que requieren mantención. Para facilitar los cálculos financieros se estima que el costo de mantención es el mismo monto en el caso de estudio como en el caso de referencia. Por lo tanto, no se considera en la evaluación económica.

5.4 Determinación de la diferencia en costos de reemplazo durante la vida útil entre los casos de estudio y los casos de referencia (dRC)

5.4.1 Condiciones borde de la determinación de la diferencia en costos de reemplazo

Comúnmente se conoce el costo de Reemplazo como costo de reposición y corresponde a aquel costo, que, en una fecha determinada se reemplaza la estructura existente por otra similar existente en el mercado y con una utilidad equivalente.

En el caso que se considera una vida útil de una construcción en un largo plazo, se deben reemplazar algunos elementos como los sistemas de climatización, puertas, ventanas o elementos de techumbre y fachada. Estos elementos tienen una vida útil en general más corta que la construcción en total.

5.4.2 Determinación de la diferencia en costos de reemplazo entre los casos de estudio y los casos de referencia

En el presente estudio se calcula con una vida útil de 20 años. Generalmente cumplen todas las partes de la construcción con esta vida útil y no requieren ser reemplazadas durante el plazo de la evaluación de la rentabilidad. Para facilitar los cálculos financieros se estima que el costo de reemplazo en los casos de estudio sea el mismo, que en los casos de referencia. Por lo tanto, no se considera en la evaluación económica.

5.5 Determinación de la diferencia de los costos del ciclo de vida entre los casos de estudio y los casos de referencia (dLCC)

En el marco del presente estudio, se ejecutaron, simulaciones térmicas multifactoriales. La meta es el análisis de la factibilidad de la implementación del estándar Passivhaus en el centro sur de Chile. Para que esto sea factible deben ser expuestos dos puntos generales:

- Factibilidad de la implementación desde el punto de vista de la construcción, tecnológica.
- Casas construidas según el estándar deben ser rentables para lograr una implementación masiva.

En el presente capítulo se analiza la rentabilidad según la metodología descrita anteriormente. Un resultado de las simulaciones térmicas es la diferencia en la demanda energética para refrigeración y calefacción entre los casos de estudio y sus casos de referencia asociados construidos según la reglamentación térmica RT vigente. Para realizar la vinculación de los costos de energía y de los costos de construcción con los resultados de las simulaciones térmicas, se eligió un software de base de datos avanzados. El total de los casos de estudio analizados son 20.736 casos. Cada caso cuenta con la definición de los 12 parámetros analizados y con su caso de referencia asociado. Este caso de estudio con su caso de referencia contiene los resultados de las simulaciones térmicas, los resultados de la vinculación con los costos de construcción, los resultados de la vinculación de los gastos en consumo energético y los resultados del análisis de la diferencia en los costos del ciclo de vida. Por lo tanto, se obtiene al final una base de datos con una matriz de 20.736 líneas y 38 columnas lo que da la suma de 787.968 datos. Para vincular todos los datos necesarios se utilizó el software de base de datos Microsoft ACCESS que es más estable en el manejo de una multitud de datos que una hoja de cálculo como por ejemplo MS EXCEL.

El proceso de la vinculación se realizó en las siguientes etapas con los datos y la metodología descrita anteriormente:

- I. Importar datos de las simulaciones térmicas.
- II. Determinar la diferencia en costos de inversión inicial dIC entre los casos de estudio y casos de referencia.
 - a. Determinar los m² construidos por piso, muro, ventana, entrepiso, techo, alero, persiana según nivel de cada parámetro para los casos de estudio y casos de referencia.
 - b. Determinar los sistemas de climatización utilizados en los casos de estudio y casos de referencia.
 - c. Determinar los precios unitarios de los elementos constructivos y de los sistemas de climatización.

- d. Vincular los m² construidos y los sistemas de climatización con los precios unitarios.
 - e. Calcular la diferencia en costos de inversión inicial dIC entre los casos de estudio y casos de referencia.
- III. Determinar la diferencia en los costos de operación dOC durante la vida útil con el valor actual neto.
- a. Determinar las condiciones bordes como vida útil, tasa de inflación, tasa de interés, aumento del precio de la energía, tipo de moneda, factor de descuento.
 - b. Determinar el consumo en energía auxiliar para los casos de estudio y casos de referencia.
 - c. Determinar los factores de rendimiento para convertir la demanda energética en el consumo energético para los casos de estudio y casos de referencia.
 - d. Determinar el precio unitario por kWh de energía.
 - e. Vincular el consumo energético con los precios unitarios de energía para los casos de estudio y casos de referencia.
 - f. Calcular la diferencia en los costos de operación dOC durante la vida útil con el valor actual neto para los casos de estudio y casos de referencia.
- IV. Analizar la rentabilidad con la diferencia de los costos del ciclo de vida dLCC y con el periodo de recuperación de la inversión inicial.
- a. Calcular la diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC entre los casos de estudio y los casos de referencia.
 - b. Calcular el periodo de recuperación de la inversión inicial más alta de los casos de estudio en comparación a los casos de referencia.
- V. Evaluar e interpretar los resultados del análisis de rentabilidad con métodos estadísticos.

La interpretación y los resultados del análisis de rentabilidad siguen en el próximo capítulo nº 6.

CAPÍTULO
6.

RESULTADOS DEL ANÁLISIS
DE RENTABILIDAD

6 Resultados del análisis de rentabilidad

6.1 Diferencia en los costos de inversión dIC entre edificación Passivhaus y caso de referencia

6.1.1 Diferencia en los costos de inversión (dIC) entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia

La metodología, con respecto a la determinación de la diferencia en los costos de inversión, se encuentra en el capítulo 5.2. Se determinan los costos de inversión para los casos de estudio y para los respectivos casos de referencia y luego se calcula la diferencia entre estos dos. Este resultado es la diferencia en los costos de inversión dIC.

Se determinaron los costos de inversión a través de los precios unitarios señalados en el Anexo C. La fluctuación de los costos de inversión, los cuales se pueden observar en la ilustración 6-1, se producen por un cambio en los costos de inversión, en los componentes de la obra que tienen influencia en el comportamiento energético térmico. En la ilustración se muestra, por separado para cada ciudad, el costo de la inversión en relación a la demanda energética total de todos los 20.736 casos de estudio (todos) con sus respectivos casos de referencia (RT). Los casos, los cuales cumplieron el criterio Passivhaus (CP) se encuentran, generalmente, en el lado izquierdo de los gráficos, por su baja demanda energética. Además, se observa en los gráficos, que los casos de estudio muestran un costo de inversión más elevado que sus respectivos casos de referencia. Otra observación interesante, es que los casos con bajas demandas energéticas no muestran necesariamente una inversión inicial más elevada que los casos con una demanda energética elevada, lo que significa, que un buen diseño y una buena solución constructiva pueden presentar una demanda energética baja sin implicar un costo más elevado. En general, no se puede observar una relación importante entre los costos de inversión y la demanda energética.

En la tabla 6-1, se muestran los valores promedios y la desviación estándar de la diferencia en los costos de inversión inicial entre los casos que cumplieron el estándar Passivhaus y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt.

Tabla 6-1: Promedio y desviación estándar de la diferencia en los costos de inversión (dIC) entre los casos Passivhaus (CP) y sus casos de referencia (RT) (elaboración propia).

	Promedio dIC [Pesos]	Desviación estándar dIC [Pesos]
Santiago CP	\$ 5.726.231	\$ ± 1.916.644
Concepción CP	\$ 6.149.390	\$ ± 2.288.231
Puerto Montt CP	\$ 6.443.873	\$ ± 1.722.846

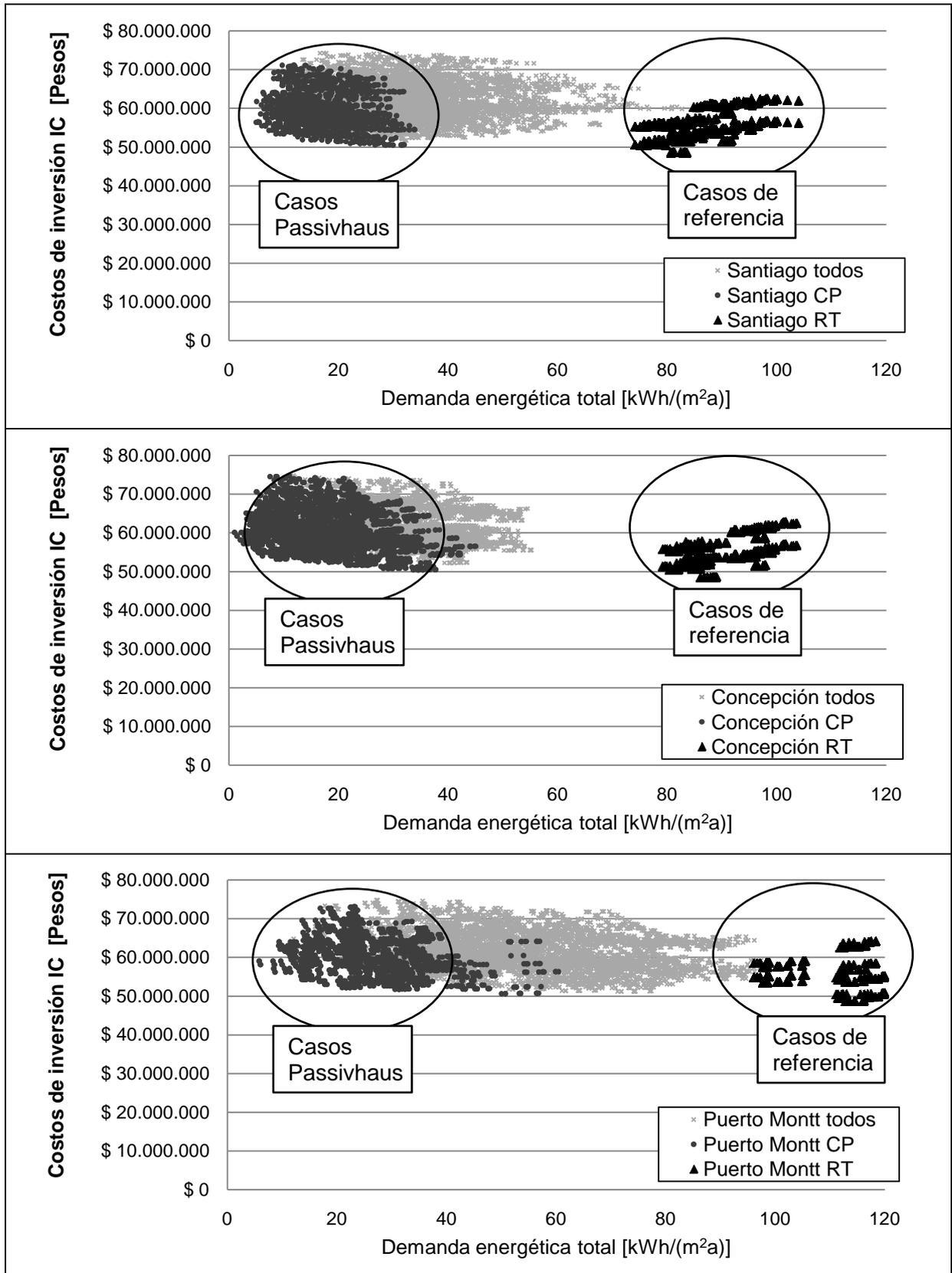


Ilustración 6-1: Costos de inversión IC de los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt en relación a la demanda energética total (En base a una vivienda de 2500 UF, 100 m² de superficie útil) (elaboración propia).

En la tabla 6-1, se presentan los casos que cumplen con el estándar Passivhaus con un costo inicial más elevado, alcanzando un promedio entre 5.7 a 6.4 millones de pesos en relación a sus casos de referencia construidos según reglamentación térmica vigente.

En la ilustración 6-2, se muestra el resumen estadístico, en forma de un diagrama de caja, de la diferencia en los costos de inversión inicial entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia. En el gráfico, se separaron los casos que cumplieron con el estándar (CP) y los casos que no lo cumplieron (NO). Se observa, que existen algunos casos extremos que logran el estándar Passivhaus con una inversión inicial más elevada, de menos de un millón de pesos y, hay casos donde la diferencia en la inversión inicial supera los 12 millones de pesos.

Se puede determinar, que la diferencia en la inversión inicial entre los casos que lograron el estándar y los casos que no lo lograron, es mínima en las tres ciudades estudiadas, aunque las casas Passivhaus representan valores levemente elevados en las ciudades de Concepción y Puerto Montt.

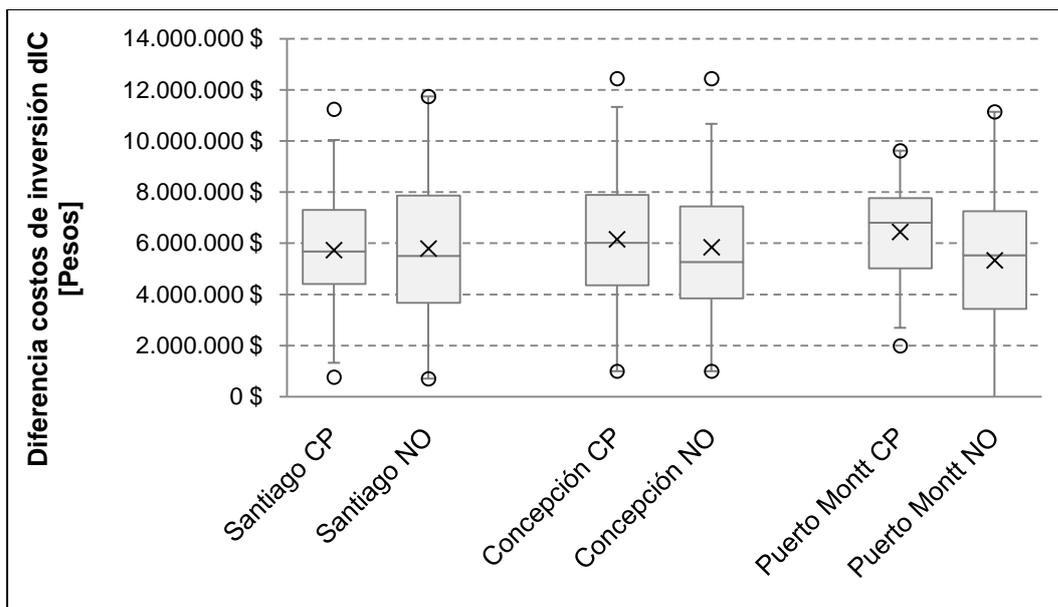


Ilustración 6-2: Diferencia en los costos de inversión (dIC) entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).³

³ El gráfico es de la forma box-plot o diagrama de caja, que muestra una medida de centralidad (Mediana), una medida de dispersión (Rango intercuartilico RIC), y la presencia de posibles outlier. El diagrama de caja básicamente muestra los 5 números de resumen (Mínimo, Cuartil1(Q1), Cuartil2 (Q2), Cuartil3(Q3) y Máximo). En su construcción los bigotes (Whisker) se construyen como $Q1 - 1.5RIC$ y $Q3 + 1.5RIC$, donde $RIC = Q3 - Q2$. Los valores mínimos y máximos se graficaron como punto en el extremo. Los bigotes son las barras de error y la caja es definida por los cuartiles 1 y 3. La línea dentro de la caja es la mediana y la cruz el valor promedio.

6.1.2 Distribución de la diferencia de los costos de construcción de sus distintos componentes

Como se mencionó en el párrafo anterior existe una diferencia en los costos de inversión entre los casos Passivhaus y sus respectivos casos de referencia. Esta diferencia se puede desglosar en los distintos elementos y componentes, los cuales tienen una influencia en el comportamiento energético térmico de la construcción.

En la ilustración 6-3, se muestra la diferencia promedio entre los costos de inversión de los casos Passivhaus y sus casos de referencia, desglosados en los distintos elementos de la construcción. Se observa, que el ítem con la diferencia más alta es el de las ventanas, dado que, la exigencia de calidad para las ventanas, según reglamentación térmica RT, es muy baja en comparación a la calidad de ventanas requeridas para lograr el estándar Passivhaus. El segundo punto con una diferencia alta es el de los sistemas de climatización. Aunque, se sustituye una calefacción central por el sistema de ventilación, el sistema de ventilación con recuperación de calor tiene un costo aproximado de dos millones de pesos más. Estos dos puntos, es decir, las ventanas y el sistema de ventilación, representan la mayor parte de la diferencia dIC, dado que, todavía son elementos poco conocidos en el mercado nacional. Con el futuro aumento en la demanda de estos componentes en el mercado y la fabricación nacional del sistema de ventilación se espera una reducción de los precios y así simultáneamente una reducción de la diferencia en los costos de inversión inicial para una edificación Passivhaus.

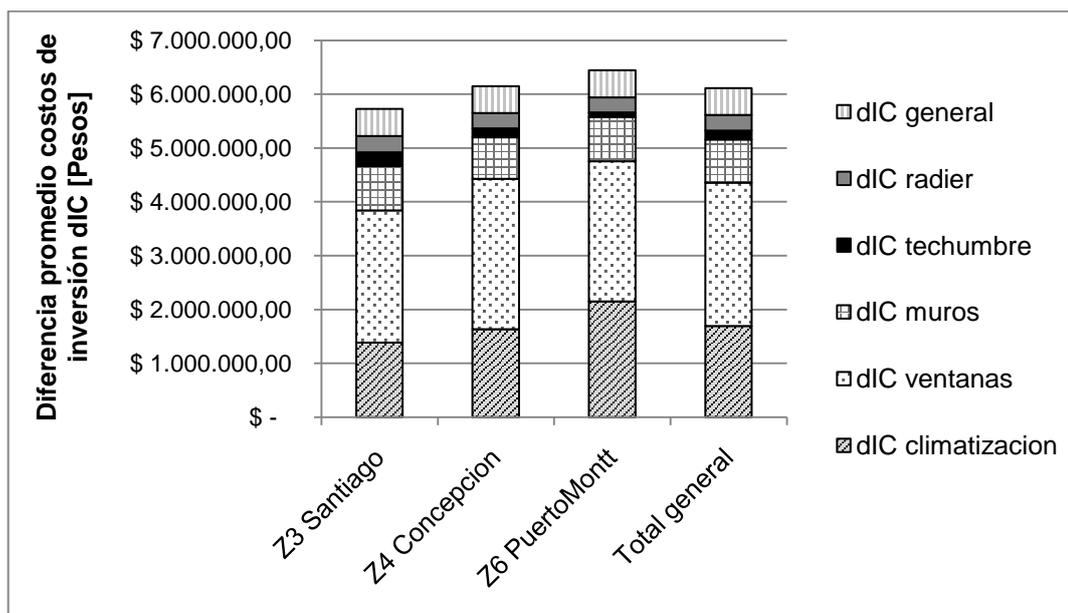


Ilustración 6-3: Distribución desglosada de la diferencia promedio de los costos de inversión entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).

La diferencia en los costos de construcción para el caso de la envolvente opaca se distribuye en primer lugar en los muros, en segundo lugar en los radiere y en último lugar en las techumbres. Esta distribución tiene su explicación en las exigencias de la reglamentación térmica RT. Puesto que, esta exige para las techumbres, una calidad en el aislamiento térmico relativamente equivalente a las exigencias para un Passivhaus, mientras que, las exigencias para los muros son relativamente bajas, en comparación, al Passivhaus. La RT no exige, en el caso de los radiere, una aislación térmica, mientras que, sí, se requiere para el estándar Passivhaus. El último punto, en la diferencia entre los costos de inversión inicial, son los costos generales para una edificación Passivhaus que se desprenden del ensayo de hermeticidad, de la asesoría y simulaciones térmicas, como se ha descrito en el capítulo 5. La influencia de cada nivel de los parámetros a la diferencia de los costos de construcción, se muestra detalladamente en Anexo C.

6.2 Diferencia en costos de operación dOC entre edificación Passivhaus y caso de referencia

6.2.1 Costos de operación capitalizados y diferencia en los costos de operación

Los costos de operación de una edificación son los costos que ocurren durante la vida útil con diferentes frecuencias. En el presente trabajo se considera, en el punto costos de operación, los costos de la energía para climatizar la edificación como se ha descrito en el capítulo 5. Se determina el valor neto actual VAN de los costos de operación con las condiciones bordes descritas en este mismo capítulo. Por consiguiente, claramente, estos costos de energía para la climatización sólo serán válidos cumpliendo con las exigencias del confort interior descritos en el capítulo 1, por lo tanto, será difícil extrapolar estos costos a otro nivel de confort.

Se muestra en la ilustración 6-4, la correlación entre el valor neto actual de los costos de operación y de la demanda energética total de los casos de estudio (todos) y sus respectivos casos de referencia (RT). En el caso de los costos de operación se puede observar una correlación fuerte entre los costos y la demanda energética. En las ciudades de Concepción y Puerto Montt se muestra una correlación casi lineal, mientras que, en Santiago hay una correlación más dispersa causada por la demanda energética en refrigeración. Esta demanda en refrigeración se transforma en el consumo energético y así en costos de operación a través del rendimiento del equipo (ESEER). Este rendimiento, en el caso de refrigeración, es más alto que en el caso de la calefacción. Se puede observar, que los casos Passivhaus (CP) presentan demandas energéticas bajas y costos de operación igualmente bajos en comparación a sus respectivos casos de referencia (RT).

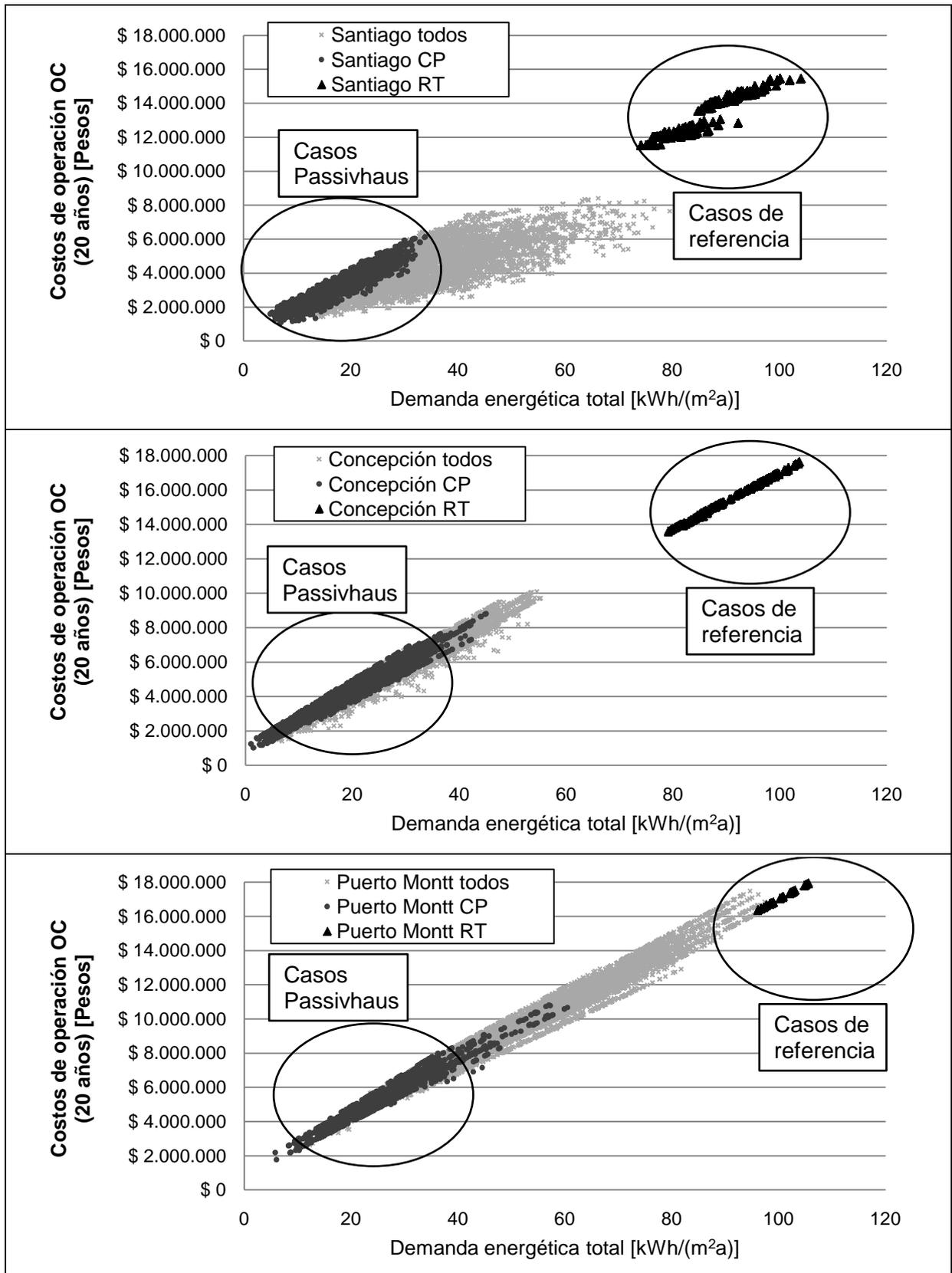


Ilustración 6-4: Costos de operación OC capitalizados de los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt en relación a la demanda energética total (Tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).

En la ilustración 6-5, se muestra el resumen estadístico de la diferencia de costos de operación entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en forma de un diagrama de caja. Se separaron los casos que cumplieron el estándar Passivhaus (CP) y aquellos casos que no lo cumplieron (NO). En general, los casos Passivhaus muestran en las tres ciudades estudiadas una diferencia en los costos de operación más alta que los casos que no lograron el estándar. Por lo tanto, esto significa, que el ahorro en gastos energéticos en las casas Passivhaus es más alto que en las casas que no logran el estándar. Esta tendencia aumenta en las ciudades del sur, puesto que sus necesidades en calefacción son más elevadas.

En Puerto Montt es posible ahorrar con una casa Passivhaus, durante la vida útil de la casa, un promedio de 14 millones hasta 18 millones de pesos.

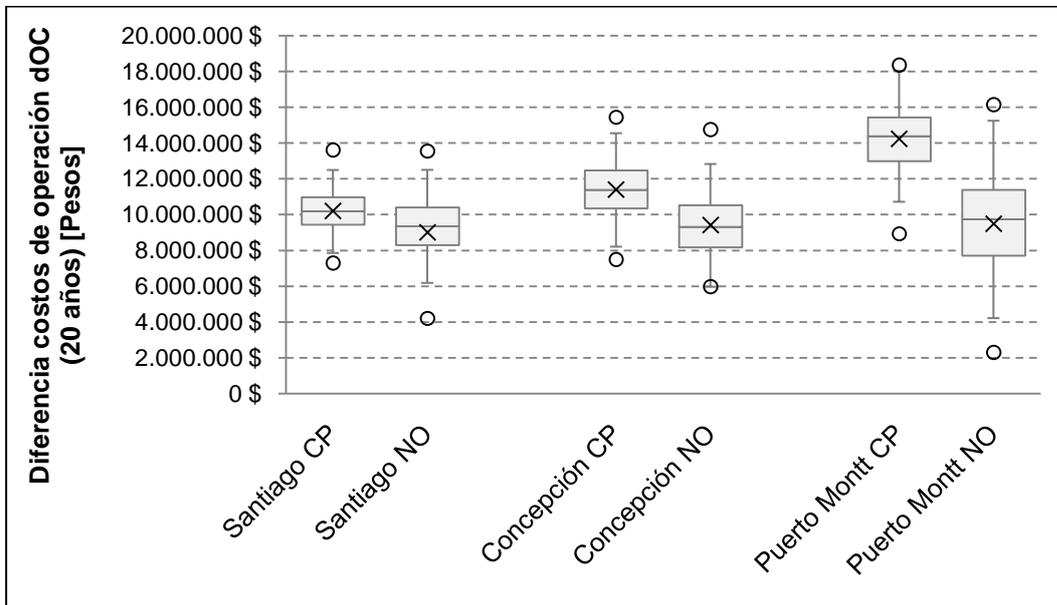


Ilustración 6-5: Diferencia en los costos de operación capitalizados (dOC) entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt (Tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).

Los valores promedios y sus desviaciones estándar de la diferencia en costos de operación durante la vida útil de la casa se muestran en la tabla 6-2. El ahorro promedio en gastos energéticos de una casa Passivhaus en comparación a una casa construida según la reglamentación térmica es en Santiago, de aproximadamente, 10 millones de pesos; en Concepción más de 11 millones de pesos y en Puerto Montt supera los 14 millones de pesos.

La influencia de cada nivel de los parámetros a la diferencia de los costos de operación, se muestra detalladamente en el Anexo C.

Tabla 6-2: Promedio y desviación estándar de la diferencia en los costos de operación capitalizados (dOC) entre los casos Passivhaus (CP) y sus respectivos casos de referencia (RT) en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).

	Promedio dOC [Pesos]	Desviación estándar dOC [Pesos]
Santiago CP	\$ 10.199.523	\$ ± 1.154.183
Concepción CP	\$ 11.390.997	\$ ± 1.475.027
Puerto Montt CP	\$ 14.234.199	\$ ± 1.746.492

6.2.2 Distribución de los costos de operación anual desglosados por el uso final

El valor neto actual de los costos de operación durante la vida útil se determina a través de los costos anuales. En la ilustración 6-6 y en la tabla 6-3, se muestran los costos anuales promedio de los casos que cumplieron el estándar Passivhaus y sus respectivos casos de referencia, desglosados por aplicación. En Concepción y Puerto Montt no existen costos por refrigeración como en Santiago, sin embargo estos costos en Santiago tampoco son significativos. Las casas Passivhaus tienen un costo en energía auxiliar de aproximadamente 50.000 pesos anuales más elevados que las casas de referencia, debido al consumo de los ventiladores del sistema de ventilación.

En general, las casas Passivhaus muestran un ahorro promedio, de los gastos energéticos anuales, que fluctúan entre los 700.000 pesos hasta 1.000.000 de pesos, en comparación a casas según reglamentación térmica RT siempre bajo las mismas condiciones de confort interior.

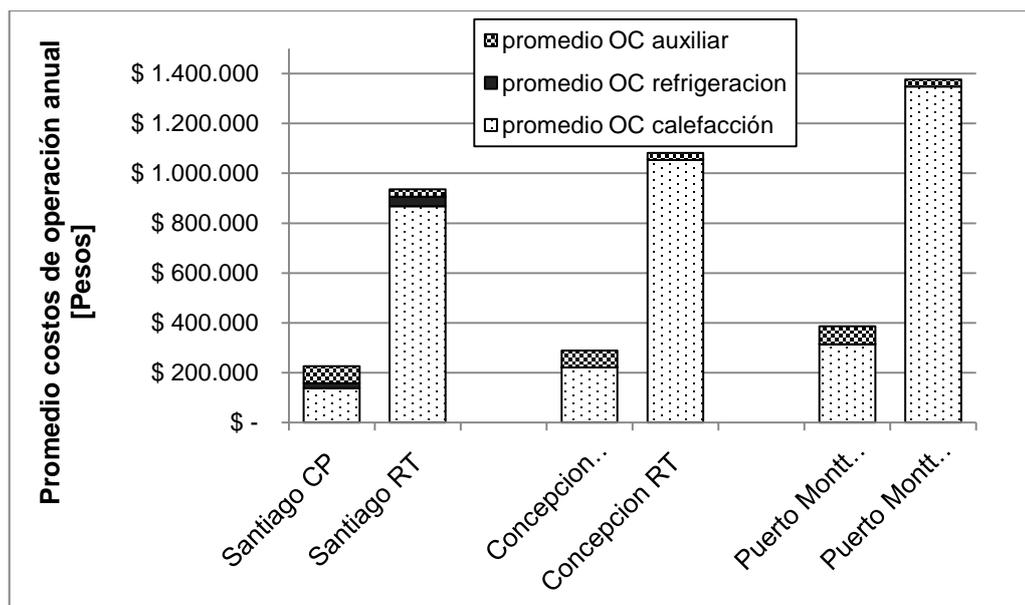


Ilustración 6-6: Promedio de los costos anuales de la operación de los casos que cumplieron el estándar Passivhaus (CP) y sus respectivos casos de referencia (RT) (elaboración propia).

Tabla 6-3: Promedio y desviación estándar de los costos de operación anual (OC) entre los casos Passivhaus (CP) y sus respectivos casos de referencia (RT) en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).

	Promedio OC anual [Pesos]	Desviación estándar OC anual [Pesos]
Santiago CP	\$ 225.304	\$ ± 70.982
Santiago RT	\$ 934.710	\$ ± 67.685
Concepción CP	\$ 289.033	\$ ± 97.062
Concepción RT	\$ 1.081.309	\$ ± 70.450
Puerto Montt CP	\$ 386.068	\$ ± 116.497
Puerto Montt RT	\$ 1.376.096	\$ ± 83.830

6.3 Costos del ciclo de vida dLCC entre edificación Passivhaus y caso de referencia

6.3.1 Diferencia en los costos del ciclo de vida entre edificación Passivhaus y caso de referencia

La diferencia en los costos del ciclo de vida es la suma de los costos con el valor neto actual entre costos de inversión inicial y costos de operación durante la vida útil de la edificación.

En la ilustración 6-7, se muestran los costos del ciclo de vida durante los años en el ejemplo de una casa Passivhaus y su respectivo caso de referencia con los valores promedios obtenidos del estudio paramétrico de los casos de Concepción. En el año 0 de vida de la construcción, la casa Passivhaus tendrá un valor de 6.149.390.- pesos más que su caso de referencia. Este valor es la diferencia promedio en los costos de inversión inicial (dIC) determinado en el capítulo 6.1. Durante los años, aumentará significadamente la curva del caso de referencia, en comparación a la casa Passivhaus, por sus altos costos de operación (dOC), determinados en el capítulo 6.2.

Después, de aproximadamente 9 años, se cruzan las dos curvas y la inversión inicial más elevada del Passivhaus se recuperará a través del ahorro en gastos energéticos en el transcurso de los años. El periodo de recuperación se analiza de una manera más detallada en el capítulo 6.4.

Se puede determinar, a través de la distancia de las dos curvas, la diferencia en los costos del ciclo de vida (dLCC). Si se considera una vida útil de 20 años la casa Passivhaus tendrá aproximadamente 5 millones de pesos menos de costo que la casa de referencia. Este valor claramente aumenta al considerar una vida útil más larga.

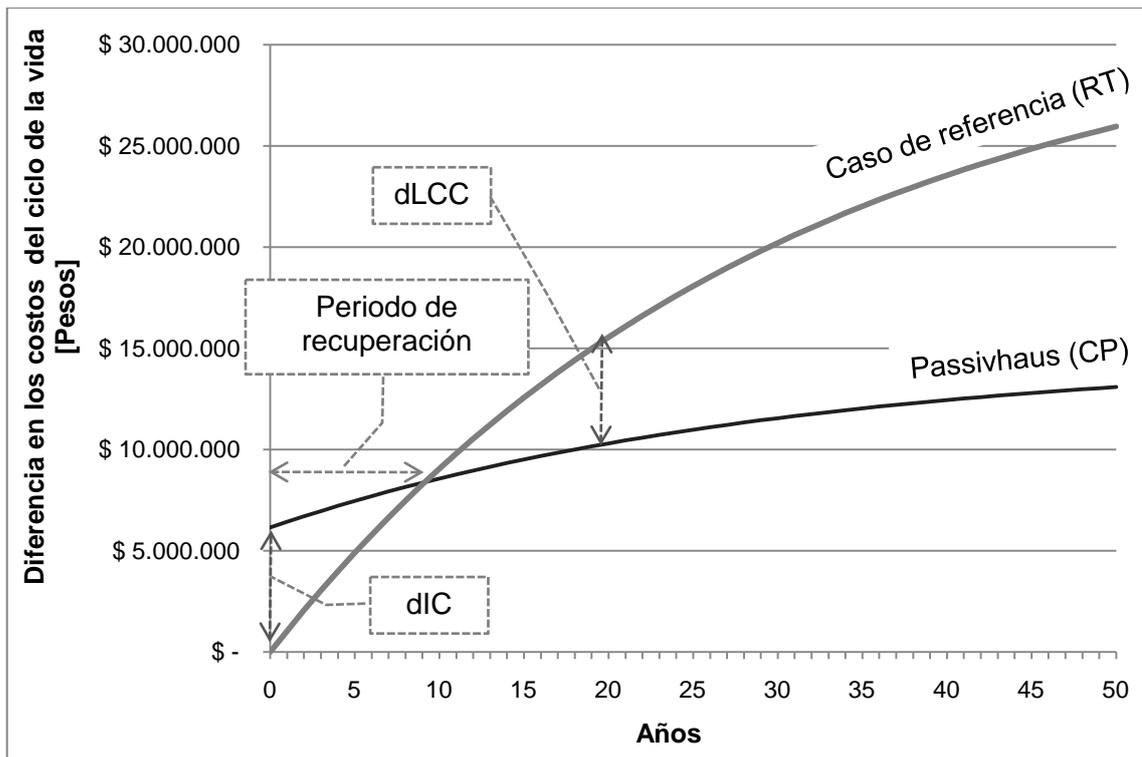


Ilustración 6-7: Diagrama de los costos del ciclo de vida de una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con los valores promedio en el ejemplo de Concepción (Tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).

Se muestra en la ilustración 6-7, con el ejemplo de los valores promedio de Concepción, que la casa Passivhaus es una opción rentable en comparación a su caso de referencia, aunque tienen una inversión inicial más elevada.

En la ilustración 6-8, se muestra la diferencia en los costos del ciclo de vida (dLCC) entre todos los casos de estudio (todos) y sus respectivos casos de referencia, separada por las ciudades estudiadas. El valor es la diferencia en los costos del ciclo de vida considerando una vida útil de 20 años. Un valor positivo significa, que el caso de estudio es económicamente rentable en comparación a su caso de referencia; un valor negativo significa, que el caso de referencia es más rentable y, el valor absoluto indica el tamaño de la rentabilidad.

Todos los casos que lograron el estándar Passivhaus (CP) son sin excepción rentables, dado que, se encuentran todos en el lado positivo de la escala. Las mejoras en la eficiencia energética de los otros casos de estudio, que no lograron el estándar, no siempre, son rentables. Sobre todo en Santiago y Concepción existen casos que no son rentables.

Se puede observar, principalmente en Concepción y Puerto Montt, que existe una breve tendencia de una correlación entre demanda energética y diferencia en los costos del ciclo de vida. Los casos más rentables, pretenden tener una demanda energética baja mientras, los casos menos rentables, muestran una demanda energética elevada.

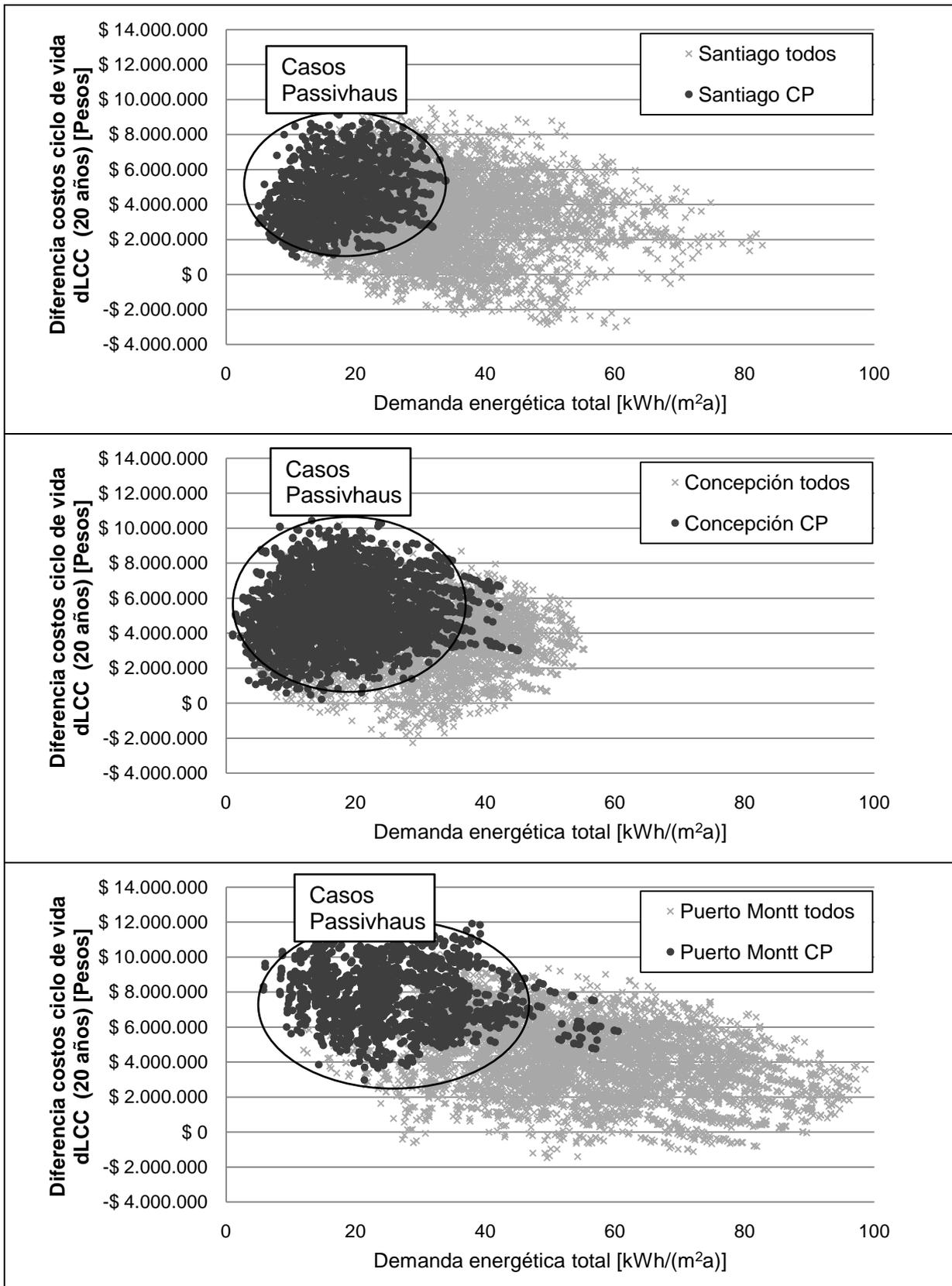


Ilustración 6-8: Diferencia de los costos del ciclo de vida capitalizados dLCC de los casos de estudio y sus casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt en relación a la demanda energética total (Tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).

En la ilustración 6-9, se muestra el resumen estadístico de la diferencia de costos del ciclo de vida entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia, en forma de un diagrama de caja. Se separaron los casos, en aquellos que cumplieron el estándar Passivhaus (CP) y en aquellos que no lo cumplieron (NO). En general, los casos Passivhaus muestran en las tres ciudades estudiadas, una diferencia más alta en los costos del ciclo de vida que los casos que no lograron el estándar, lo que significa, que los casos Passivhaus son más rentables que los casos que no cumplieron con el estándar.

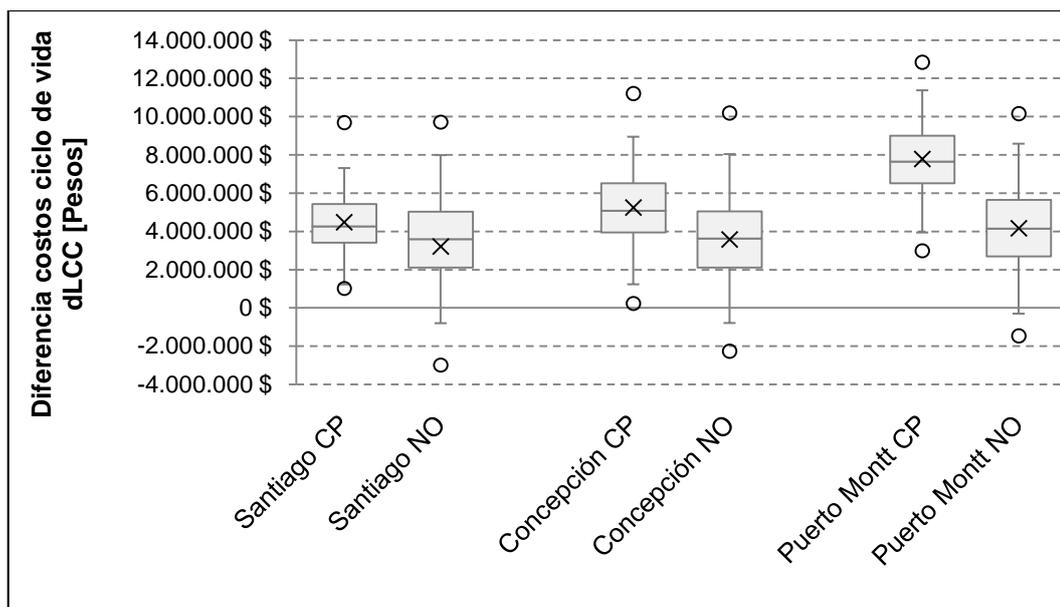


Ilustración 6-9: Diferencia en los costos del ciclo de vida capitalizados (dLCC) entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt (Tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).

Se puede inferir con respecto al análisis de los casos estudiados en el estudio paramétrico, tal como se puede observar en la tabla 6-4 y la ilustración 6-9:

**Casas construidas según el estándar Passivhaus son rentables
en Santiago, Concepción y Puerto Montt
(en comparación a una casa construida según reglamentación térmica RT)**

En la tabla 6-4, se muestran los valores promedios y la desviación estándar de la diferencia en los costos del ciclo de vida capitalizados (dLCC) entre los casos Passivhaus (CP) y sus respectivos casos de referencia (RT) en Santiago, Concepción y Puerto Montt. La rentabilidad promedio del Passivhaus aumenta de Santiago en 4,5 millones de pesos a Puerto Montt en 7,8 millones de pesos lo que muestra que la aplicación del estándar en climas fríos resulta ser más rentable que en climas más templados.

Tabla 6-4: Promedio y desviación estándar de la diferencia en los costos del ciclo de vida capitalizados (dLCC) entre los casos Passivhaus (CP) y sus respectivos casos de referencia (RT) en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).

	Promedio dLCC [Pesos]	Desviación estándar dLCC [Pesos]
Santiago CP	\$ 4.473.293	\$ ± 1.552.304
Concepción CP	\$ 5.241.606	\$ ± 1.783.331
Puerto Montt CP	\$ 7.790.326	\$ ± 1.722.157

6.3.2 Influencia de los diferentes niveles de los parámetros en la diferencia de los costos del ciclo de vida de todos los casos de estudio

Se analiza en el presente párrafo, la influencia de los diferentes niveles variados de los parámetros en el estudio paramétrico, con respecto a la diferencia en los costos del ciclo de vida. Se realiza este análisis con todos los 20.736 casos de estudio (todos) para determinar conclusiones más generales y no solo validas para los casos Passivhaus.

Se puede determinar a través de este análisis la rentabilidad de cada nivel de los parámetros descritos en el capítulo 3, pero, siempre en comparación a su respectivo caso de referencia. Aunque se demostró en los sub capítulos anteriores, que el estándar Passivhaus es rentable en Santiago, Concepción y Puerto Montt, no se demostró cuales de las mejoras en la eficiencia energética, son las más rentables.

Uno de los parámetros que se varió en el estudio paramétrico es la inercia térmica, la cual se varió entre el nivel inercia térmica baja e inercia térmica alta. Estos dos están representados por el sistema constructivo de madera sólida, en el caso de inercia térmica baja y por el sistema constructivo de hormigón armado, en el caso de inercia térmica alta. Se eligió la madera sólida como representante de la inercia térmica baja, por el proyecto FONDEF (Hempel, et al., 2012) en cuyo marco se inserta el presente trabajo. Los dos sistemas constructivos elegidos tienen precios unitarios muy distintos, dado que, el sistema constructivo de madera sólida se encuentra en Chile en un nivel piloto, por lo tanto, no existe un mercado regular, por eso los precios resultan elevados. Para el presente estudio sobre la influencia de los parámetros de rentabilidad, no se toma en cuenta el parámetro de la inercia térmica, dado que, los cálculos económicos, en este caso, no representan la inercia térmica, sino que, el sistema constructivo. Este hecho produce una confusión en la interpretación de los resultados. En las siguientes ilustraciones, se destaca el parámetro inercia térmica, con un tono más claro.

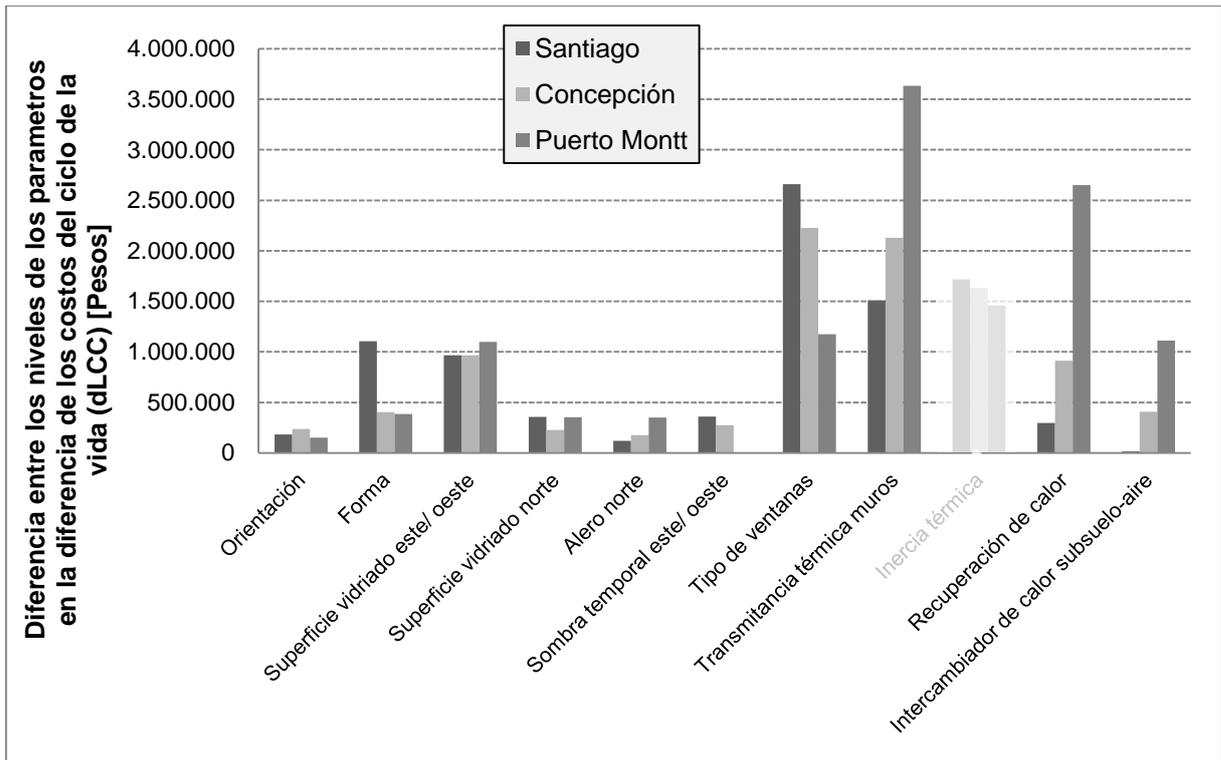


Ilustración 6-10: Influencia de los distintos niveles de los parámetros a la diferencia en los costos del ciclo de vida (dLCC) entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).

En la ilustración 6-10, se muestra el promedio de la diferencia entre casos de estudio y casos de referencia, en su diferencia de los costos del ciclo de vida, entre el nivel más alto y el más bajo de un parámetro. En Puerto Montt por ejemplo, es la diferencia en los costos del ciclo de vida, entre caso de referencia y caso de estudio, 3.6 millones de pesos más alto con el mejor nivel de aislación térmica que con el peor. En el Anexo C se muestra el mismo gráfico por ciudades separadas. El parámetro con un valor de diferencia alta es un parámetro que es muy sensible al cambio de su nivel. En Puerto Montt, por ejemplo, entre tener o no tener recuperación de calor existe una diferencia grande en los costos del ciclo de vida, que clasifica este parámetro como el segundo más importante.

Se puede observar, que se forman tres grupos. El primer grupo con los parámetros Orientación, Superficie vidriada norte, Alero norte y sombra temporal este/oeste no muestra un comportamiento muy distinto a la rentabilidad con un cambio de sus niveles, lo que significa que estos parámetros no influyen significativamente en la rentabilidad.

El segundo grupo está formado por los parámetros Forma, Superficie vidriada este/oeste e Intercambiador de calor subsuelo. Este grupo representa una influencia media en la rentabilidad cuando cambia sus niveles en los parámetros.

El tercer grupo, y el grupo con la mayor influencia en la rentabilidad económica, está formado por los parámetros Tipo de ventanas, Transmitancia térmica y Recuperación de calor, aunque este último, sin duda, tiene su mayor influencia en Puerto Montt.

En las ilustraciones 6-11, 6-12 y 6-13 se muestra la diferencia en los costos de inversión dIC, la diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC y el periodo de recuperación de la inversión inicial de los parámetros con sus niveles variados. La suma entre la diferencia de los costos de inversión dIC y la diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC es, la diferencia en los costos de operación dOC. Las diferencias en los costos y el periodo de recuperación, se determinan siempre entre el caso de estudio y su respectivo caso de referencia.

En la ilustración 6-11, se puede observar la influencia de cada nivel de los parámetros a la rentabilidad en la ciudad de **Santiago**.

- El parámetro que muestra el cambio más significativo es el de Tipo de ventanas. El doble vidriado hermético relleno con argón y una capa de baja emisividad ($U=1,3$) tiene un costo de inversión alto en comparación a su posible ahorro en el consumo energético, aunque igualmente es más rentable que la configuración del caso de referencia, donde en la mayoría de los casos se utiliza, vidrios simples. Desde el punto de vista de la rentabilidad, un doble vidriado hermético ($U=2,7$), muestra un mejor desempeño que el de ($U=1,3$).
- El parámetro de la Transmitancia térmica muestra claramente que un alto nivel de aislación térmica ($U=0,2$) es un método que no presenta una inversión inicial muy elevada, pero produce un ahorro en gastos energéticos durante la vida útil de la edificación. Una mejora de la eficiencia energética a través del aumento de la aislación térmica de la envolvente, es el primer método a aplicar por su bajo impacto en la inversión inicial.
- Un sistema de ventilación con recuperación de calor representa en Santiago una rentabilidad levemente más baja por sus elevados costos de inversión inicial, que un sistema de ventilación simple. La diferencia promedio entre los costos del ciclo de vida de los dos son, aproximadamente, 300.000 pesos, por lo tanto la rentabilidad futura depende fuertemente de los precios del mercado.
- Se puede señalar, con respecto al tamaño de las superficies vidriadas, que las superficies vidriadas con tamaños grandes en las tres orientaciones estudiadas, norte, este y oeste en general, muestran una rentabilidad brevemente menor que tamaños más pequeños, debido a su mayor costo de inversión inicial.

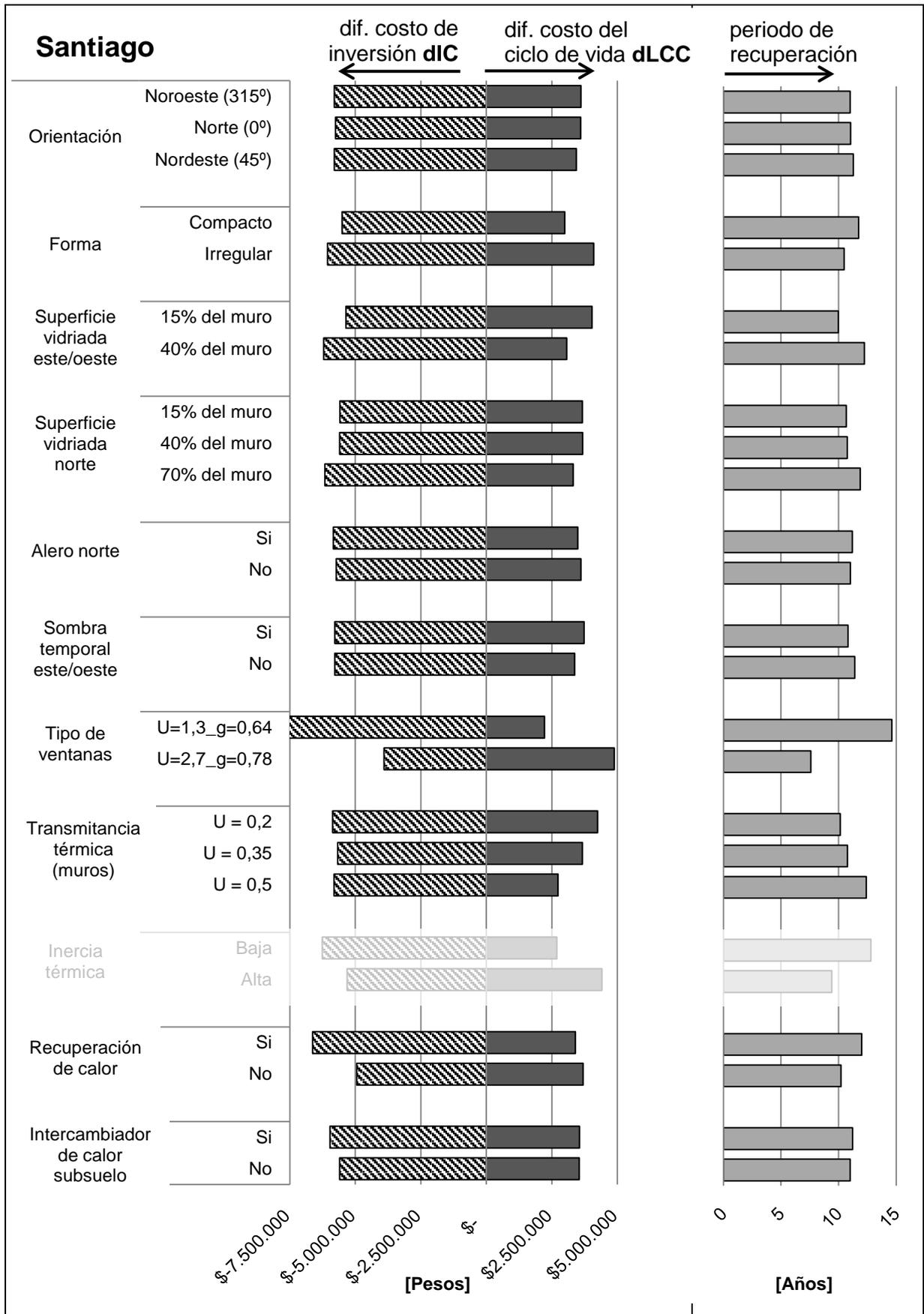


Ilustración 6-11: Costos de inversión, costos del ciclo de vida y periodo de recuperación de la inversión inicial separados por parámetro y nivel en Santiago (elaboración propia).

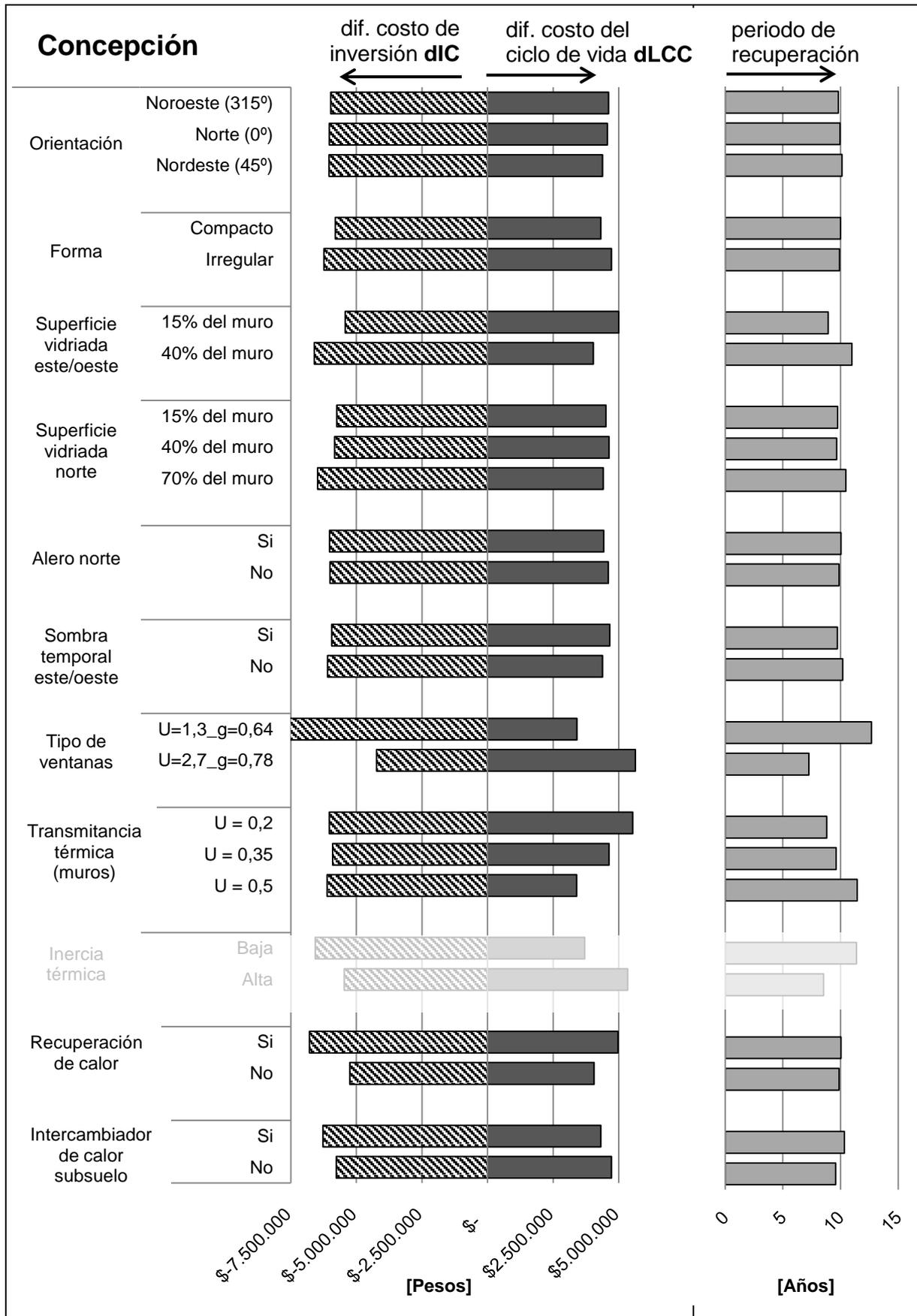


Ilustración 6-12: Costos de inversión, costos del ciclo de vida y periodo de recuperación de la inversión inicial separados por parámetro y nivel en Concepción (elaboración propia).

En las ilustraciones 6-12 y 6-13, se puede observar la influencia de cada nivel de los parámetros con respecto a la rentabilidad en las ciudades de **Concepción y Puerto Montt**.

- La Transmitancia térmica de la envolvente es, en Concepción y Puerto Montt, un parámetro dominante. Se observa claramente, que altos niveles de aislacion térmica ($U=0,2$) presentan una excelente rentabilidad durante el ciclo de vida de la edificación. La razón es la misma que se describe en el caso de Santiago; los costos de inversion son bajos y el potencial de ahorro es grande. En Puerto Montt, por su clima más frío, la influencia es más fuerte que en Concepción.
- Tipos de la ventana: Las ventanas con doble vidriado hermético común ($U=2,7$) muestran en Concepción y Puerto Montt un mejor desempeño económico que las ventanas doble vidriado relleno con argón y una capa de baja emisividad ($U=1,3$) dado que, las ventanas $U=1,3$ tienen un costo de inversion inicial significativamente más alto que las ventanas $U=2,7$. La diferencia en el desempeño económico entre los dos tipos es mayor en Concepción que en Puerto Montt y se estima, que en las ciudades más al sur de Puerto Montt, serán las ventanas $U=1,3$ la mejor opción económica.
- Sistema de ventilación con recuperación de calor: En las dos ciudades, Concepción y Puerto Montt se presenta un sistema de ventilación con recuperación de calor, ya que representa una muy buena opción para bajar los costos del ciclo de vida de una edificación. Los costos de inversión inicial son claramente más elevados, pero, por otra parte, el ahorro en gastos energéticos durante la vida útil de la edificación, es mucho mayor que la inversión inicial. La diferencia en los costos del ciclo de vida es, en Concepción aproximadamente de un millón de pesos y en Puerto Montt de aproximadamente 2,7 millones de pesos.
- Un tamaño reducido de las Superficies vidriadas con orientación este y oeste, demuestra una mejor rentabilidad que un tamaño grande, mientras que, para las superficies vidriadas orientadas hacia el norte, no hay una diferencia significativa en la rentabilidad entre tamaños pequeños o grandes.
- Un Intercambiador de calor subsuelo - aire no presenta en Concepción ni en Puerto Montt, un elemento rentable para mejorar la eficiencia energética.

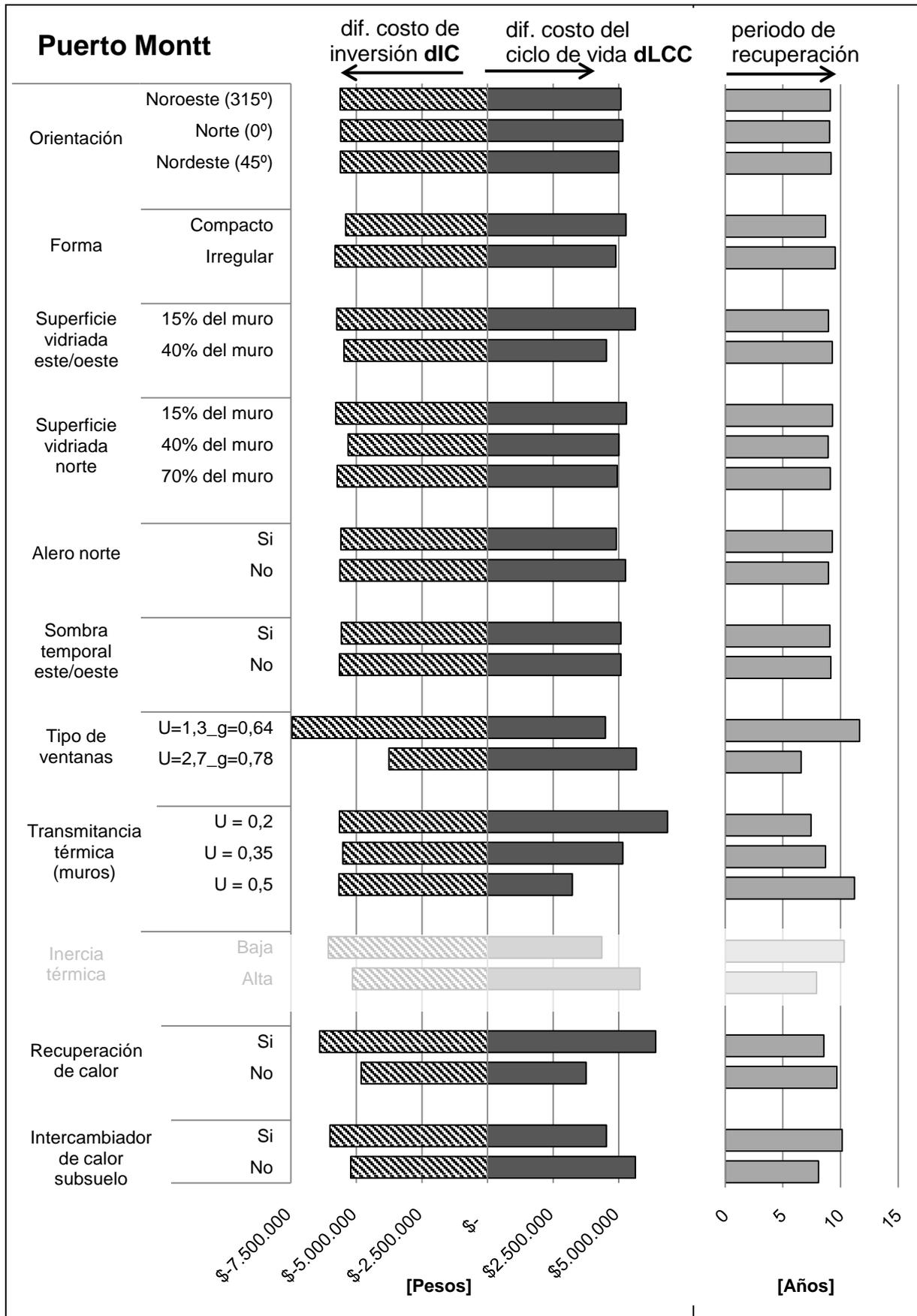


Ilustración 6-13: Costos de inversión, costos del ciclo de vida y periodo de recuperación de la inversión inicial separados por parámetros y niveles en Puerto Montt (elaboración propia).

6.4 Periodo de recuperación, costos anuales, casos altamente rentables y análisis de la sensibilidad

6.4.1 Periodo de recuperación de la inversión en una edificación Passivhaus en comparación al caso de referencia

El periodo de recuperación de la inversión (PRI) describe el plazo en el cual se recuperará la inversión inicial para un mejoramiento de la eficiencia energética a través del ahorro en gastos de operación, como se muestra en la ilustración 6-7. La principal desventaja que presenta este indicador es la siguiente: Ignora los flujos netos de dinero, más allá del periodo de recuperación, sesga los proyectos a largo plazo que pueden ser más rentables que los proyectos a corto plazo. Estas desventajas pueden inducir a los inversionistas a tomar decisiones equivocadas.

Se muestra en la ilustración 6-14, el periodo de recuperación de la inversión inicial más elevada de los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt, en relación a la demanda energética total. Todos los casos Passivhaus muestran, a pesar de sus demandas energéticas bajas, un periodo de recuperación, relativamente corto y sin excepción, dentro de la vida útil de 20 años, utilizada en el presente análisis. En Concepción y Puerto Montt, con sus climas más fríos, el periodo de recuperación es más corto que en Santiago. En las tres ciudades se puede observar una leve tendencia, que poseen los casos con bajas demandas energéticas, que es la tendencia de tener un periodo de recuperación más corto que los casos con una demanda energética elevada.

El resumen con el promedio y la desviación estándar del periodo de recuperación se muestra en la tabla 6-5. El promedio del periodo de recuperación de la inversión inicial más elevada de los casos Passivhaus (CP) en comparación a sus respectivos casos de referencia (RT) es en Santiago de aproximadamente 10 años, en Concepción de aproximadamente 9 años y en Puerto Montt entre 7 y 8 años.

Tabla 6-5: Promedio y desviación estándar del periodo de recuperación de la inversión inicial más elevada de los casos Passivhaus (CP) y sus respectivos casos de referencia (RT) en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).

	Promedio periodo de recuperación [Años]	Desviación estándar periodo de recuperación [Años]
Santiago CP	9,64	± 3,19
Concepción CP	9,18	± 3,29
Puerto Montt CP	7,52	± 1,98

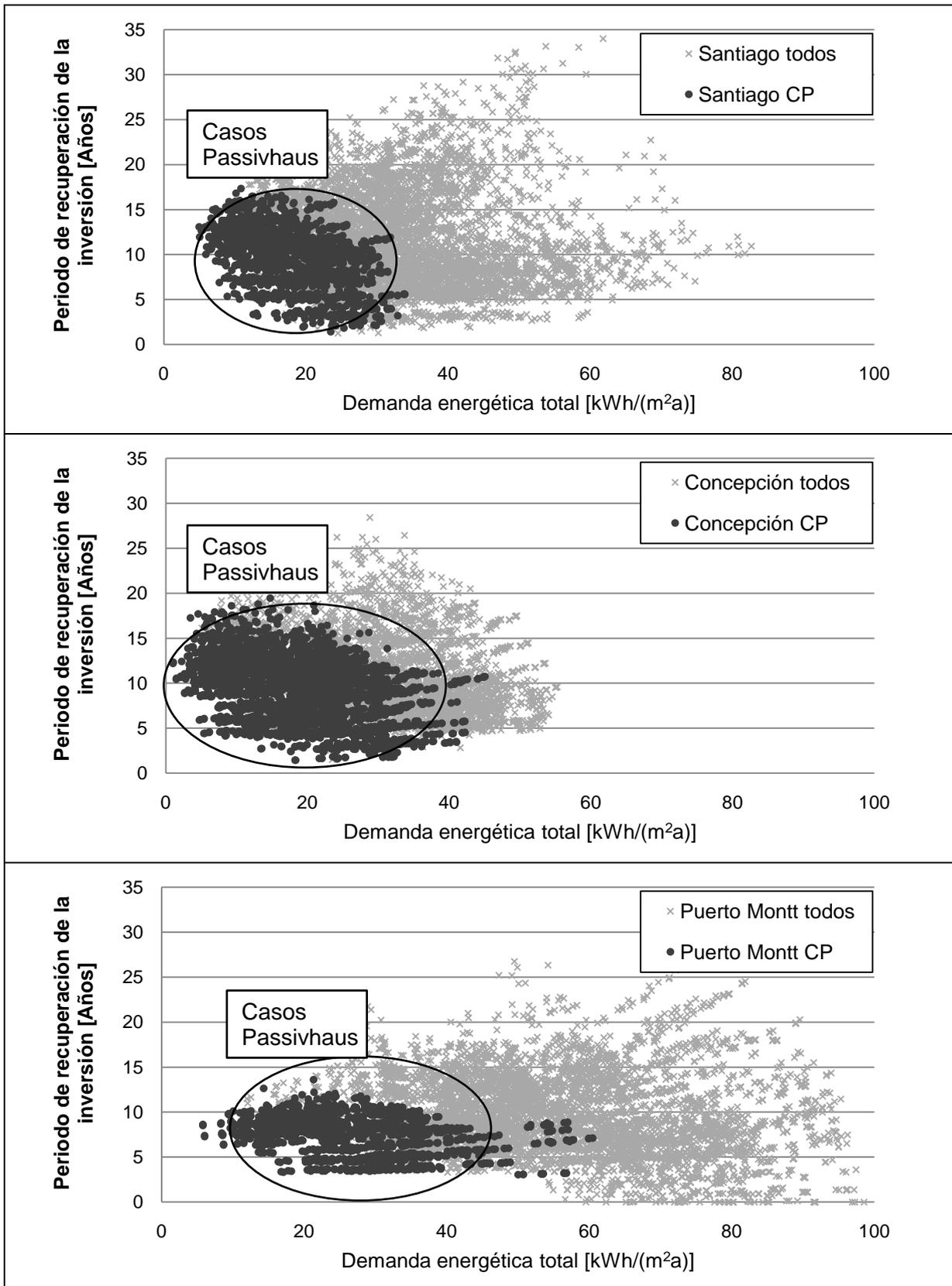


Ilustración 6-14: Periodo de recuperación de la inversión inicial más elevada de los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt en relación a la demanda energética total (Tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).

En la ilustración 6-15, se muestra el resumen estadístico del periodo de recuperación de la inversión inicial más elevada de los casos de estudio en comparación a sus respectivos casos de referencia, en forma de un diagrama de caja. Se separaron los casos en aquellos que cumplieron con el estándar Passivhaus (CP) y en aquellos casos que no lo cumplieron (NO). Los casos Passivhaus muestran en las tres ciudades estudiadas, en general, un periodo de recuperación más corto que los casos que no lograron el estándar, lo que significa, que la inversión inicial, en los casos Passivhaus, se recuperará más rápido que la inversión inicial en los casos que no cumplieron con el estándar. Todos los casos Passivhaus tienen un periodo de recuperación inferior a 20 años.

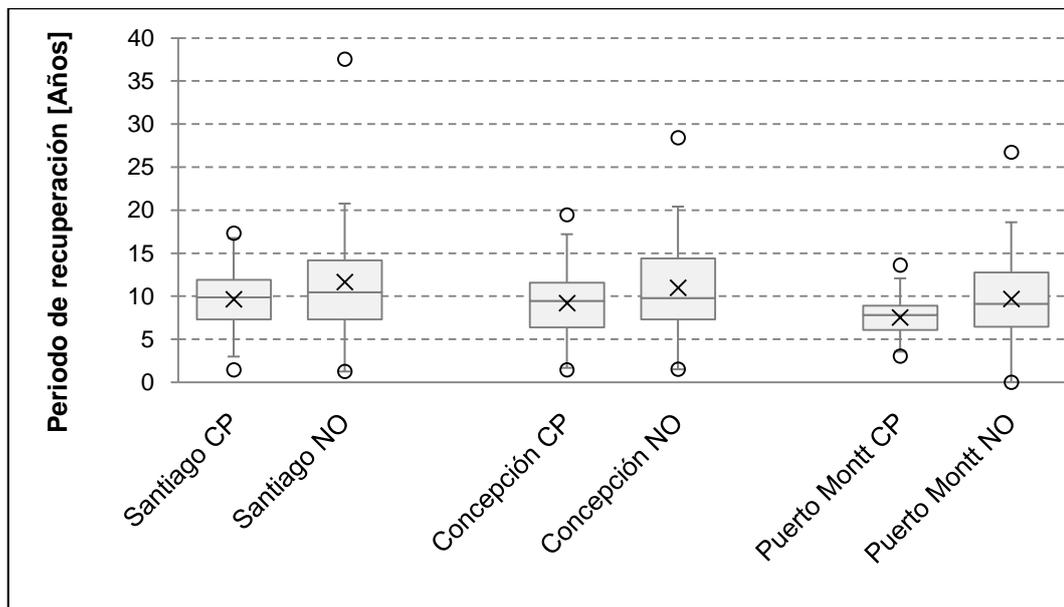


Ilustración 6-15: Periodo de recuperación de la inversión inicial más elevada de los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt (Tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).

Se muestra en las ilustraciones 6-11, 6-12 y 6-13 en el lado derecho de los gráficos, el periodo de recuperación de la inversión inicial de los parámetros con sus niveles variados. En general se puede observar una fuerte relación entre la diferencia de los costos del ciclo de vida dLCC de cada nivel de los parámetros y del periodo de recuperación. Si la diferencia dLCC de un nivel es alta (rentable), generalmente, se puede observar un periodo de recuperación corto.

La única excepción es, el periodo de recuperación de la inversión inicial de un sistema de ventilación con o sin recuperación de calor en Concepción. En este caso, es más corto el periodo de recuperación de la inversión inicial, con un sistema sin recuperación de calor que con un sistema con recuperación de calor, aunque la diferencia dLCC muestra claramente, que una ventilación con recuperación es la opción más rentable.

6.4.2 Diferencia en los costos anuales para el usuario entre edificación Passivhaus y caso de referencia con financiamiento a través de un crédito hipotecario

En la mayoría de los casos, la construcción o adquisición de una casa o edificación será financiada con un crédito hipotecario. A continuación, se calculan los costos anuales para el usuario de una casa Passivhaus y de una casa de referencia construida según reglamentación térmica, utilizando los valores promedios indicados anteriormente para la ciudad de Concepción. Los costos anuales para el usuario en el presente análisis es la suma de los costos para la devolución del crédito al banco (interés + cancelación) y los gastos en energía.

$$\text{Costos anuales} = \text{Devolución al banco} + \text{Gastos en energía}$$

En el presente ejemplo se calcula con un valor del caso de referencia de 2500UF y con una inversión adicional para la casa Passivhaus (dIC) de 6.149.390 pesos. Con las condiciones bordes descritas anteriormente, esto arroja una cuota anual de 4.513.840 pesos para el caso de referencia y de 5.012.736 pesos para la casa Passivhaus. La casa de referencia requiere 1.081.309 pesos en gastos de energía anual (OC) y la casa Passivhaus sólo 289.033 pesos. La suma de los costos anuales, para el primer año, es para el caso de referencia de 5.613.531 pesos y para la casa Passivhaus sólo de 5.306.683 pesos, por lo tanto, aproximadamente 300.000 pesos menos.

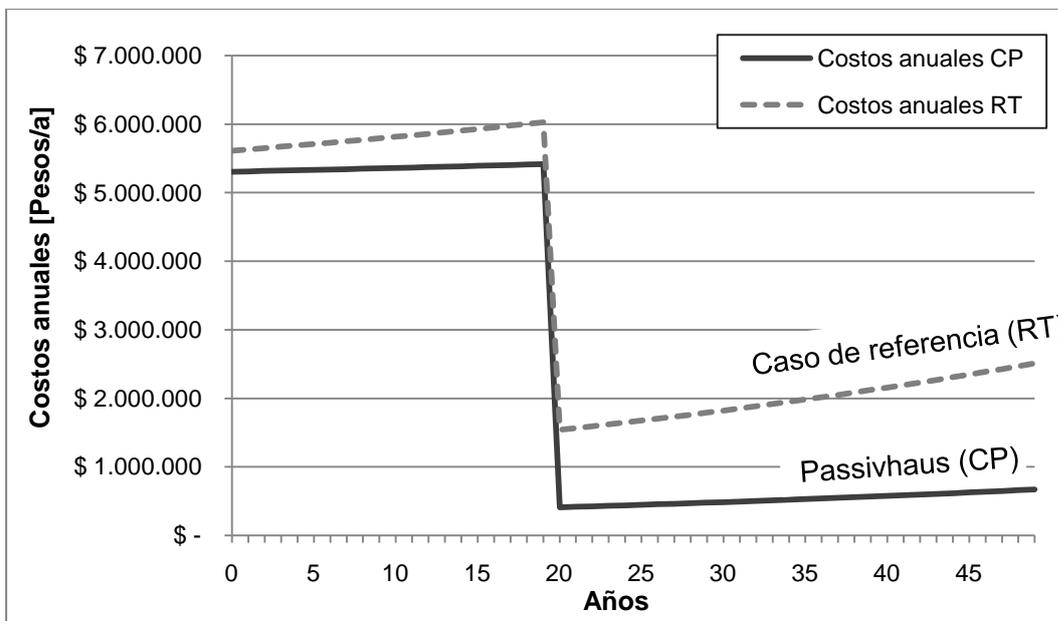


Ilustración 6-16: Costos anuales promedio de las casas Passivhaus (CP) y sus respectivos casos de referencia (RT) en Concepción durante los años financiados a través de un crédito hipotecario (En base de una vivienda de 2500 UF (RT), 100 m² superficie útil, tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).

Se muestra en la ilustración 6-16, los costos anuales promedios de las casas Passivhaus (CP) y sus respectivos casos de referencia (RT) en Concepción, durante los años financiado a través de un crédito hipotecario. Se puede observar, que la casa Passivhaus significa para el usuario, desde el primer momento, la mejor opción económica respecto de una casa construida según reglamentación térmica. El usuario de la casa Passivhaus tiene, durante los primeros 20 años, entre 300.000 a 600.000 pesos menos de costos anuales y después de la devolución del crédito, desde el año 21 en adelante 1.100.000 pesos menos de costos anuales. Esta diferencia debería aumentar durante los años por el aumento del precio de la energía.

En el Anexo C se muestran los costos anuales con los valores promedios para Santiago y Puerto Montt.

6.4.3 Los casos con la mayor rentabilidad y sus configuraciones respectivas

Se eligió dentro de los aproximadamente 7.000 casos de estudio por ciudad, el 10% con la mayor rentabilidad a través de la mayor diferencia en los costos del ciclo de vida. Se analizaron aproximadamente 700 casos por ciudad, para determinar las propiedades que tienen en común. Estas propiedades comunes y los niveles de los parámetros del promedio de los casos más rentables, se muestran en la tabla 6-6 separados por las ciudades estudiadas.

El promedio de los casos muestra en las tres ciudades la misma configuración en algunos de los parámetros. La **orientación** más rentable es hacia el norte, igual que, una **superficie vidriada** no muy grande orientada **al oeste y este** y considerando un elemento de **sombra temporal** en verano. Un **alero al norte** con una prolongación de acuerdo a lo descrito en el capítulo 3 no será una solución rentable, por lo tanto, hay que diseñar el alero para cada proyecto en forma independiente. Todos los casos más rentables cuentan con el **tipo de vidrio** doble vidriado hermético común y no con un doble vidriado hermético relleno con gas argón y una capa de baja emisividad, dado que, este último, significa una inversión inicial elevada. Los casos más rentables cuentan, igualmente para las tres ciudades, con una **transmitancia térmica** baja con un valor U muro de $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ lo que significa un nivel de aislación térmica alta. La aislación térmica tiene un bajo costo en la inversión inicial, como se mostró en los puntos anteriores y, un gran potencial en el mejoramiento de la eficiencia energética, por lo tanto, casos con un nivel de aislación térmica elevado tendrán menos costos en energía durante su vida útil.

En Santiago y Concepción una **Forma** irregular representa un mejor desempeño económico a largo plazo que una Forma compacta, viceversa en Puerto Montt. Una **superficie vidriada**

de un gran tamaño hacia el **norte** igualmente muestra un buen desempeño económico en Santiago y Concepción, mientras que, en Puerto Montt es mejor un tamaño más pequeño. Los casos con un **sistema de ventilación con recuperación de calor** en Santiago no representan, en el promedio la solución más rentable. Sin embargo, esta afirmación en este caso es dudosa, dado que, el 45% de los mejores casos cuenta con recuperación de calor y el 55% no cuenta con recuperación de calor. En Concepción y Pto. Montt es el sistema con recuperación de calor, claramente, la opción más rentable. En Santiago un **intercambiador de calor subsuelo-aire** muestra un buen desempeño, no así en Concepción y Puerto Montt.

Tabla 6-6: Diferencia en los costos del ciclo de vida entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia del 10% de los casos con la mejor rentabilidad con su combinación de los niveles de los parámetros para Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).

		Santiago	Concepción	Puerto Montt
Parámetros	Orientación	Norte (0°)	Norte (0°)	Norte (0°)
	Forma/Geometría	Irregular	Irregular	Compacto
	Superficie vidriada este/ oeste	15% del muro	15% del muro	15% del muro
	Superficie vidriada norte	70% del muro	70% del muro	15% del muro
	Alero norte	No	No	No
	Sombra temporal este/ oeste	Sí	Sí	Sí
	Tipo de ventanas	U=2,7_g=0,78	U=2,7_g=0,78	U=2,7_g=0,78
	Transmitancia térmica muros	U = 0,2	U=0,2	U=0,2
	Inercia térmica	Alta	Alta	Alta
	Recuperación de calor	No	Si	Si
	Intercambiador de calor subsuelo-aire	Si	No	No
Resultados	Diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC (promedio) [Pesos]	7.218.935 (+/- 698.133)	8.102.829 (+/- 671.936)	9.601.078 (+/- 907.141)
	Diferencia en los costos de inversión dIC (promedio) [Pesos]	-3.014.454 (+/-1.090.246)	-3.497.694 (+/-1.038.977)	-5.256.351 (+/-1.694.272)
	Diferencia en los costos de operación dOC (promedio) [Pesos]	10.233.389 (+/- 1.136.043)	11.600.524 (+/-1.171.022)	14.857.430 (+/-1.539.806)
	Periodo de recuperación de la inversión inicial (promedio) [Años]	4,5 (+/- 1,4)	4,7 (+/- 1,1)	5,6 (+/- 1,5)
	Demanda energética total (promedio) [kWh/(m ² a)]	26,6 (+/- 9,0)	19,7 (+/- 6,9)	26,3 (+/- 9,3)
	Passivhaus (posible de climatizar a través del flujo de aire) (promedio)	No	Si	Si

Con los niveles de los parámetros descritos se obtiene, en Santiago, una diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC de aproximadamente 7 millones de pesos, en Concepción de aproximadamente 8 millones de pesos y en Puerto Montt de aproximadamente 10 millones de pesos. Los casos tienen en general costos de inversión inicial no muy elevados, y por otra parte, una demanda energética baja, lo cual se refleja en costos de operación igualmente bajos. En el Anexo C, se muestra un análisis más detallado de los niveles de los parámetros.

Los casos más rentables cumplieron con el promedio en Concepción y Puerto Montt, con el criterio de climatizar a través del flujo de aire del estándar Passivhaus, mientras que, en Santiago cumplieron sólo un 37% de los casos más rentables. Esto significa, que en Concepción y Puerto Montt el estándar Passivhaus no sólo es rentable a largo plazo, sino que, es la solución con la rentabilidad más alta de todas las configuraciones estudiadas, mientras que, en Santiago se encuentran, configuraciones rentables que no cumplen con el criterio de climatizar a través del aire. Este fenómeno se puede observar, igualmente, en la ilustración 6-8.

6.4.4 Análisis de la sensibilidad al cambio del porcentaje del aumento del precio de la energía

Una mejora en la eficiencia energética puede ser rentable bajo las condiciones establecidas originalmente, pero podría no serlo, si en el mercado, las variables de costo variaran significativamente al alza o si las variables de ingreso cambiaran significativamente a la baja. La importancia del análisis de sensibilidad se manifiesta en el hecho de que los valores de las variables que se han utilizado para llevar a cabo la evaluación de la rentabilidad pueden tener desviaciones con efectos de consideración en la medición de sus resultados.

La evaluación de la rentabilidad de una mejora en la eficiencia energética será sensible a las variaciones de uno o más parámetros, si al incluir estas variaciones en el criterio de evaluación empleado, la decisión inicial cambia. El análisis de sensibilidad, revela el efecto que tienen las variaciones sobre la rentabilidad en los pronósticos de las variables relevantes. Sin embargo, son más frecuentes las equivocaciones en las estimaciones futuras por lo incierta que resulta la proyección de cualquier variable incontrolable, como los cambios en los precios de la energía.

En el presente estudio, se realiza un análisis de la sensibilidad sobre el futuro precio de la energía. En los análisis anteriores, se calculó con un aumento del precio de la energía de 1.7% anual excluyendo la tasa de la inflación. Se obtuvo este valor, como se ha descrito en el capítulo 5, del Instituto Nacional de la Estadística para el año 2011 (Instituto Nacional de Estadísticas (INE), 2011). Se varía el aumento anual del precio de la energía en el marco del

análisis de la sensibilidad entre -5%, -3%, 0%, 3% y 5%. En la ilustración 6-17 se muestra la diferencia en los costos del ciclo de vida con los valores promedio de las casas Passivhaus en Concepción, en relación al cambio del aumento del precio de la energía. El escenario más probable para un futuro cercano, son valores entre 3% y 5% lo que significa, que la rentabilidad de la inversión en una casa Passivhaus aumentará en comparación a los resultados de los estudios anteriores. En el caso no muy probable, de que el precio de la energía se mantenga constante o baje en los próximos años, la casa Passivhaus será rentable hasta una reducción del precio de la energía en aproximadamente 5% anual. Si el precio futuro de la energía bajara más de 5% anual, no se recuperará la inversión inicial más elevada en una casa Passivhaus durante los primeros 20 años y la inversión no será rentable.

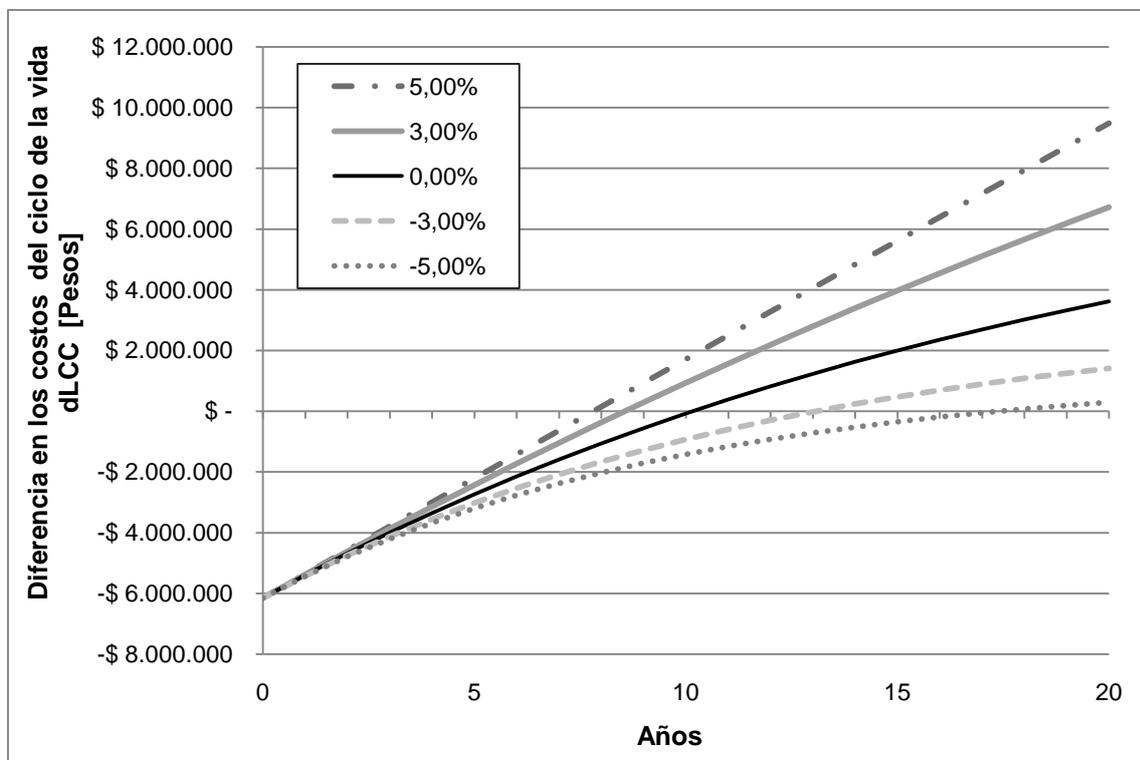


Ilustración 6-17: Variación de la diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC entre una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con los valores promedio en el ejemplo de Concepción con el cambio del aumento del precio de la energía (Tasa real 5.13% anual, elaboración propia).

Los resultados del análisis del estudio de sensibilidad sobre el aumento del precio de la energía muestran, claramente, que una inversión en eficiencia energética para lograr el estándar Passivhaus, es una inversión que minimiza el riesgo y la dependencia del futuro precio de la energía. Si los precios de la energía aumentan en el futuro, aumentará la rentabilidad de una edificación que cumple con el estándar Passivhaus.

6.4.5 Análisis de la sensibilidad al cambio del sistema de calefacción de los casos de referencia (RT)

Todos los casos de referencia (RT) cuentan, en los análisis anteriores, con un sistema de calefacción convencional, que garantiza el mismo nivel de confort interior como el sistema de climatización en los casos de estudio. Considerando el nivel económico propuesto de las viviendas se propone, como se ha descrito en el capítulo 5, una calefacción central a gas natural con radiadores en cada habitación para lograr en invierno el rango de confort deseado. Se mostró que la inversión para lograr el estándar Passivhaus, a largo plazo, es más rentable que calefaccionar una casa tradicional a través de una calefacción central. La pregunta que surge es la siguiente: ¿Será el estándar Passivhaus igualmente rentable en comparación a una casa tradicional calefaccionado con otro sistema, como por ejemplo, con una estufa a leña con combustión lenta?

Para responder esta pregunta, se realiza un análisis de la sensibilidad al cambio del sistema de calefacción de los casos de referencia (RT). Se muestra en la tabla 6-7 las opciones de distintos tipos de calefacción, las cuales se analizan.

Tabla 6-7: Distintos opciones del tipo del sistema de calefacción para los casos de referencia con el rendimiento, precio de la energía utilizada, costo estimado de la instalación del sistema y la diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC en relación a una casa Passivhaus (elaboración propia).

	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Tipo de calefacción	Calefacción central a gas	Calefactores eléctricos	Estufa de leña combustión lenta	Estufa a parafina (Laser)
Rendimiento [-]	0,75	0,95	0,64	0,90
Precio de energía [\$/kWh]	95,7	132,4	21,6	49,0
Estimación costo del sistema de climatización [Pesos]	\$ 2.036.745.-	\$ 200.000.-	\$ 600.000.-	\$ 600.000.-
Descripción	Calefacción central a gas natural con radiadores	5 calefactores eléctricos de convección para 20 m ² cada uno	Estufa a leña combustión lenta con instalación para 100 m ²	Dos estufas a Kerosén tipo laser para 50 m ² cada uno
dLCC Santiago [Pesos]	4.473.293.-	3.756.006.-	-6.139.741.-	-4.116.838.-
dLCC Concepción [Pesos]	5.241.606.-	4.763.159.-	-7.329.211.-	-4.874.717.-
dLCC Puerto Montt [Pesos]	7.790.326.-	7.691.275.-	-7.890.427.-	-4.750.352.-

La *opción 1* es la propuesta original con una calefacción central a gas natural con radiadores, la *opción 2* son cinco calefactores eléctricos distribuidos en la casa, la *opción 3* es una estufa combustión lenta y la *opción 4* son dos estufas a parafina de tipo láser. Los rendimientos de los equipos y los precios de la energía utilizada son descritos en el capítulo 5. Se analizó el cambio de las cuatro opciones para todos los casos de referencia (RT) de los 20.736 casos de estudio con el fin de determinar la sensibilidad en las diferencias en los costos de inversión (dIC), costos de operación (dOC) y costos del ciclo de vida (dLCC).

Los resultados promedios de los análisis de la diferencia dLCC se encuentran en la parte inferior de la tabla 6-7 y para el ejemplo de Concepción en la ilustración 6-18. Los resultados promedios graficados del análisis para Santiago y Puerto Montt se encuentran en el Anexo C. Los resultados varían entre las ciudades en el tamaño de los valores, pero no en las tendencias y conclusiones, por lo tanto, posteriormente sólo se discutirá el ejemplo de la ciudad de Concepción. Los costos del ciclo de vida y por lo tanto la rentabilidad es positiva para las opciones 1 y 2. Por lo tanto, esto significa, que una inversión en una casa Passivhaus es rentable en comparación a una casa de referencia según reglamentación térmica (RT) calefaccionado a través de una calefacción central o calefactores eléctricos como se puede observar en la ilustración 6-18.

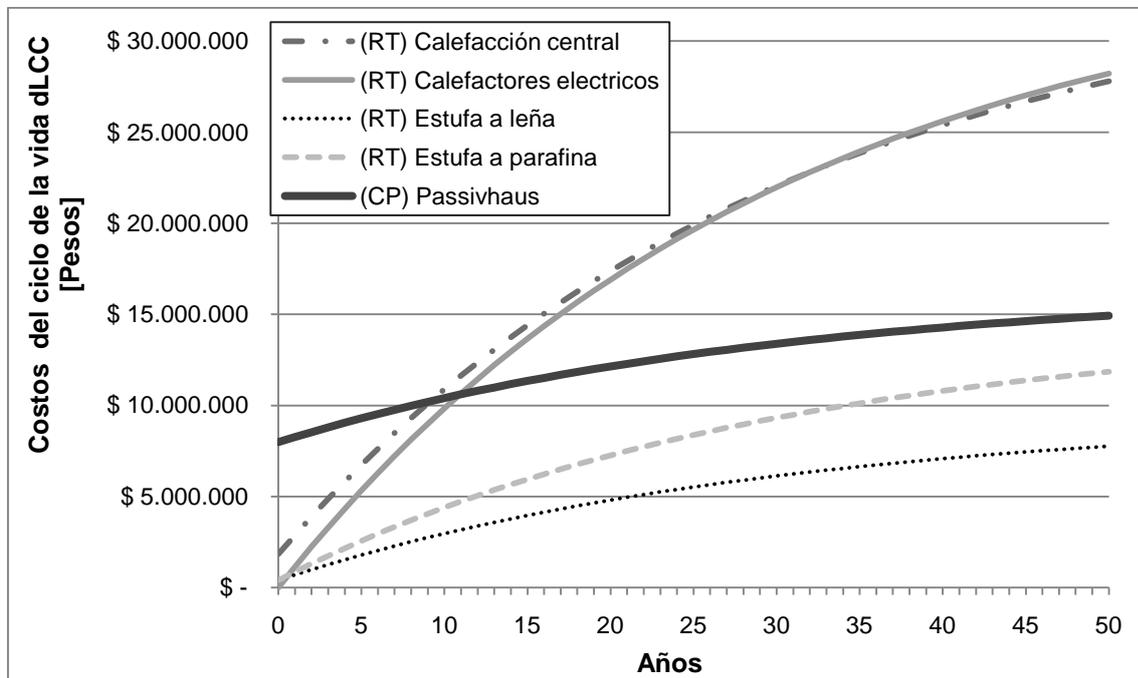


Ilustración 6-18: Gráfico de los costos del ciclo de vida de una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con distintos sistemas de calefacción (valores promedios en el ejemplo de Concepción, Tasa real 5.13% anual, 1.7% aumento anual del precio de energía, elaboración propia).

Las curvas de la calefacción central y de los calefactores eléctricos cruzan la curva del Passivhaus antes de los 10 años, por lo tanto, se recuperará la inversión inicial en una casa Passivhaus en este periodo y después la casa Passivhaus mostrará una ventaja económica.

Contraria es la situación, cuando se calefacciona los casos de referencia a través de una estufa a combustión lenta o estufas a parafina. Se puede observar en la ilustración 6-18 que las curvas de estas dos opciones no cruzan la curva de la casa Passivhaus en un plazo de 50 años. Esto significa, que no se recuperará la inversión inicial en una casa Passivhaus a través del ahorro en gastos energéticos, dado que, la parafina, y todavía más la leña, tienen un precio por kWh relativamente bajo en comparación al gas natural o la electricidad. Aunque, las opciones de estufa a combustión lenta y estufas a parafina muestran gastos anuales en la energía más elevados en comparación a la casa Passivhaus serán las opciones más rentables en el largo plazo que el Passivhaus por sus bajos costos en la inversión inicial.

Se determinó en el estudio de la sensibilidad, de que la casa Passivhaus no es necesariamente la opción más rentable. Del sólo punto de vista económico puede ser más rentable calefaccionar una casa que cumple con la reglamentación térmica con una estufa a leña o parafina, que de invertir en los componentes necesarios para una Passivhaus. Para que esta afirmación tenga validez, hay que dilucidar algunos puntos.

1. Estufa a leña de combustión lenta:

- No se puede instalar en todas las viviendas una estufa a leña, el mejor ejemplo son los edificios de departamentos de varios pisos.
- Para garantizar un confort térmico constante igual que en la casa Passivhaus hay que tener una persona que llena la estufa frecuentemente durante todo el día (¿y noche?) y la distribución del calor no es uniforme y muestra fluctuaciones.
- Para almacenar la leña hay que tener una bodega y para operar la estufa una persona que cargue la leña, dado que no funciona automáticamente.
- En ciudades con una contaminación alta del aire, como en Santiago, no se recomienda calefaccionar con leña para no provocar más contaminación y en las situaciones de Alerta, Preemergencia y Emergencia Ambiental está prohibido según el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (Gobierno de Chile, 2010), el funcionamiento de todo tipo de calefactores que utilicen leña o biomasa destinadas a la calefacción de viviendas y de establecimientos públicos y privados, estén o no provistas de sistemas de doble cámara de combustión.

2. Estufa a parafina tipo láser:

- Las estufas a parafina tipo láser, las cuales no cuentan con un ducto para evacuar los gases de la combustión al exterior contaminan el aire interior de la vivienda.
- Las estufas a parafina cuentan con un estanque relativamente pequeño, por lo tanto hay que llenarlas frecuentemente lo que no es un proceso muy confortable.
- La distribución del calor no es uniforme.

Considerando los puntos de la argumentación anterior, se puede concluir de que considerando sólo el criterio económico, será la casa Passivhaus no siempre la mejor opción. Por lo tanto, se sugiere en el momento de tomar la decisión de construir una casa eficiente o una casa que cumple justo con la reglamentación, hay que considerar otros criterios adicionales aparte de la rentabilidad. Estos criterios son los criterios descritos en el capítulo 1 como: confort interior, calidad del aire interior, confortabilidad del manejo de los sistemas de calefacción, reducción de las emisiones de CO² y partículas, protección del medioambiente o la protección de los recursos naturales como el petróleo entre otros.

CAPÍTULO
7.

SÍNTESIS, CONCLUSIONES
Y TRABAJOS FUTUROS

7 Síntesis, Conclusiones y Trabajos futuros

7.1 Síntesis de los resultados del estudio paramétrico con respecto a los objetivos propuestos

7.1.1 Síntesis de los resultados con respecto a los objetivos propuestos relacionados con el comportamiento energético/térmico del estándar Passivhaus

No existe información científica que establezca como 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 para tres ciudades diferentes del centro sur de Chile.

Como se ha descrito en el capítulo 2, con los resultados del estudio, se pretende orientar al arquitecto o al ingeniero, en el proceso del diseño de una casa Passivhaus en Chile, además, de ofrecer información sobre el comportamiento de casas pasivas, desde el punto de vista de la demanda energética del confort térmico y de la rentabilidad económica.

En el marco de esta investigación, se creó una base teórica para facilitar la implementación del estándar Passivhaus en Chile y específicamente se lograron aclarar los siguientes puntos propuestos en el capítulo 2:

- *Determinar la demanda energética en calefacción de una casa Passivhaus en el centro-sur de Chile.*

Se determinó la demanda energética promedio en calefacción de una casa Passivhaus entre 11 y 27 kWh/(m²a) en dependencia a la ubicación climática. Los resultados obtenidos para la ciudad de Santiago muestran valores inferiores a los de Concepción y Puerto Montt.

- *Determinar, si es necesario, refrigerar una casa Passivhaus en el centro sur de Chile y determinar la demanda energética respectiva en refrigeración.*

En el clima de la ciudad de Santiago se observa una cierta posibilidad de sobrecalentamiento de los espacios interiores, tanto en casas Passivhaus como en casas construidas según reglamentación térmica. La demanda energética respectiva para refrigerar la casa Passivhaus, en Santiago, es en promedio de 6 kWh/(m²a) aproximadamente, lo que es levemente menor que la demanda de los casos de referencia. En Concepción y Puerto

Montt, generalmente no existe la necesidad de refrigerar una edificación Passivhaus, siempre y cuando el diseño sea adecuado.

- *Determinar la diferencia de la demanda energética entre los casos de estudio y sus casos de referencia respectivos.*

Interesante de observar es el hecho, de que las casas Passivhaus en Europa central y sus casas de referencia, tienen una diferencia porcentual en la demanda energética similar a la diferencia obtenida en este estudio entre Passivhaus y caso de referencia en Chile. Feist habla, por ejemplo, de un ahorro de 83% y según el presente estudio, el ahorro en Chile es de aproximadamente un 78%. Los valores absolutos son parecidos (Feist, et al., 2001). Feist habla de una demanda energética de los casos de referencia entre 90-150 kWh/(m²a) y de los casas Passivhaus alrededor de 15 kWh/(m²a). Esto significa, que una persona en Chile, siempre gasta, bajo las mismas condiciones de confort interior, casi la misma cantidad en energía para climatizar su casa que en Europa central, donde existe un clima mucho más severo.

- *Determinar los límites de la demanda energética de casas pasivas en Chile.*

Los casos de estudio, analizados bajo el criterio de ser climatizados a través del flujo de aire exterior necesario, arrojan demandas energéticas similares a las demandas exigidas en Europa central. Se propone por lo tanto, como se ha explicado de una manera más detallada en el capítulo 7.2, que el límite en la demanda energética para refrigeración, igual que para calefacción, es de 15 kWh/(m²a).

- *Determinar la influencia, de los diferentes parámetros estudiados, en el cumplimiento del estándar y de la demanda energética en calefacción y refrigeración. Determinar la influencia, de diferentes zonas climáticas, y proponer soluciones para lograr el estándar.*

En Santiago, los parámetros relacionados con la protección solar con el fin de evitar un sobrecalentamiento en verano, muestran una influencia significativa, mientras que, en Concepción y Puerto Montt son los parámetros relacionados para evitar pérdidas de calor en invierno, los que muestran una influencia significativa. En Concepción y Puerto Montt es esencial tener un sistema de ventilación con recuperación de calor y un alto nivel de aislación térmica.

- *Determinar los valores recomendados de la transmitancia térmica y de los tipos de ventanas.*

Para Santiago y Concepción se recomienda valores U máximos de los muros de $U \leq 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, de los techumbres $U \leq 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ y de los radieres $U \leq 0,65 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Para Puerto Montt: en los muros $U \leq 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, en el techumbre $U \leq 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ y en el radier $U \leq 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. En Concepción y Puerto Montt se recomienda ventanas termo paneles mejoradas con valores $U \leq 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ y un factor solar $g \geq 0,6$. Estos también son recomendables en Santiago, aunque termopaneles comunes muestran un desempeño aceptable. Las recomendaciones para las tres ciudades estudiadas están descritas en el capítulo 4.6 de una manera más detallado.

7.1.2 Síntesis de los resultados con respecto a los objetivos propuestos relacionados con la rentabilidad del estándar Passivhaus

Se analizó en los capítulos 5 y 6 la rentabilidad del estándar Passivhaus en comparación a casos construidos para cumplir la reglamentación térmica (RT). Se mostró, que la diferencia en los costos de construcción (dIC) no tiene una correlación significativa con la demanda energética, mientras que la diferencia en los costos de operación (dOC) si tiene una correlación significativa. Esto significa que se puede mejorar la eficiencia energética a través de un diseño adecuado y minimizar simultáneamente los costos de construcción. Los casos con costos de construcción elevados, no mostraron necesariamente un mejor desempeño energético.

Se lograron aclarar los siguientes puntos propuestos en el capítulo 2 relacionados con la rentabilidad del estándar Passivhaus:

- *Determinar la diferencia de costos de construcción y operación, entre los casos de estudio y sus casos de referencia respectivos.*

Las casas Passivhaus mostraron en general, costos de construcción en aproximadamente 4 a 8 millones de pesos más elevados que los casos de referencia. Por otra parte presentaron las casas Passivhaus un potencial de ahorro en gastos energéticos durante la vida útil entre aproximadamente 10 a 15 millones de pesos.

- *Analizar la rentabilidad económica del estándar Passivhaus, en comparación a los casos respectivos de referencia.*

Se puede recuperar la inversión inicial más elevada de las casas Passivhaus, a través de su ahorro en gastos energéticos durante su vida útil y, además, obtener un ahorro en gastos energéticos de aproximadamente 4 a 9 millones de pesos durante el mismo periodo. Las casas Passivhaus son más rentables en climas similares al de Puerto Montt que en climas similares al de Santiago, dado al potencial de ahorro energético. Comparando una casa Passivhaus con una casa tradicional utilizando una estufa a leña, la casa Passivhaus no muestra una ventaja económica por el bajo precio de la leña.

- *Analizar el periodo de recuperación, de los costos iniciales, más elevados de los casos de estudio en comparación a sus casos respectivos de referencia.*

Las casas Passivhaus tienen un periodo de recuperación de sus costos iniciales más elevados, de aproximadamente 6 a 12 años.

7.2 Conclusiones

7.2.1 Propuesta de una definición de los criterios del estándar Passivhaus para el centro-sur de Chile

Se analizó en el marco del presente estudio, si los valores límites de las demandas energéticas en refrigeración y calefacción utilizados, en Europa central, igualmente son válidos para el centro-sur de Chile. Los resultados en el capítulo 4, muestran una leve desviación de los límites, pero en un rango aceptable. Se propone, por lo tanto, aplicar los mismos valores límites que en Europa central, lo que además, facilitará la implementación del estándar y evitará el riesgo de una confusión posible si se aplicaran valores distintos. Algunos criterios, como por ejemplo, el consumo de energía primaria total, no fueron estudiadas en el presente trabajo y se propone por lo tanto aplicar para ellos, los valores límites de Europa central, hasta que posibles estudios futuros determinen otros criterios.

La propuesta de los criterios para el cumplimiento del estándar Passivhaus en Chile contiene, generalmente, las mismas obligaciones como en Europa central. Esta propuesta ha sido publicado en (Hatt et al., 2012). Los puntos clave son, entre otros:

- Demanda energética máxima para calefacción: 15 kWh/(m²a).
- Demanda energética máxima para refrigeración: 15 kWh/(m²a), (recomendación para las ciudades de Concepción y más al sur: 0 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 exterior sin utilizar recirculación.
- Nivel de hermeticidad: 0,6 ACH @50Pa en general y en climas con temperaturas mínimas de no menos de 0°C no debe superar los 1,0 ACH @50Pa.
- 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 evitar problemas de condensación y garantizar condiciones de confort térmico.

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). Sólo 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.

7.2.2 Consideraciones y conclusiones generales

Una de las preguntas de investigación del presente trabajo es:

EL ESTÁNDAR PASSIVHAUS EN CHILE:
¿UNA NUEVA OPORTUNIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN
SUSTENTABLE PARA EL CENTRO-SUR DE CHILE?

La respuesta elaborada en el marco del estudio es “Sí, el estándar Passivhaus es una nueva oportunidad, pero indudablemente no la única”. Se demostró en el capítulo 4 que se puede ahorrar en el centro-sur de Chile, igual que en Europa central, con construcciones que cumplan con el estándar Passivhaus, en aproximadamente un 80% de energía en climatización, en comparación a construcciones que cumplen con la reglamentación térmica vigente en Chile. 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. El potencial de ahorro energético es el argumento más fuerte a favor del estándar. Este ahorro energético manifiesta sus consecuencias positivas y sustentables a nivel mundial y nacional, como la reducción del impacto ambiental, la reducción de las emisiones de CO² y una mayor independencia de la energía, sobre todo de la energía no renovable.

El segundo punto a favor de la implementación del estándar es que, aparte de la posibilidad de bajar considerablemente la demanda energética, el aumento del confort interior, como está descrito en el capítulo 1. Se logra una temperatura interior confortable y estable y, una temperatura superficial interior de la envolvente más alta, especialmente de las ventanas, para evitar condensación superficial y crecimiento de moho. Se garantiza, además del confort térmico, una alta calidad de aire por su renovación constante a través del sistema de ventilación, una ventaja que generalmente, no existe en el mercado de las viviendas en Chile.

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 de aislación térmica exigida en Múnich. La tecnología para construir casas Passivhaus, con 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 del mercado nacional. Se pueden construir casas Passivhaus 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. Indudablemente 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 et al., 2011). Un obstáculo puede ser la baja disponibilidad en el mercado de maestros y profesionales capacitados para este tipo de construcción, ya sea en el proceso del diseño o en la ejecución de la obra.

Sin duda, como está descrito en capítulo 6, las construcciones que logran el estándar Passivhaus tienen un costo de inversión inicial más alto que una construcción que sólo cumple con la reglamentación térmica actual en Chile. Pero, por otro lado, estas construcciones tienen un costo de operación de aproximadamente un 80% más bajo que una construcción tradicional. Con este ahorro en los costos de operación, se recupera el costo inicial más alto durante la vida útil de la construcción. El sistema de ventilación de una casa Passivhaus, 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 significativamente, dado que, un sistema de ventilación con recuperación de calor tiene un costo similar al de una calefacción central. Por esta razón, la rentabilidad económica depende, del nivel económico de la vivienda con la cual se está comparando. Si es una vivienda pensada con un sistema de calefacción central, será rentable el estándar Passivhaus, pero en el caso de una vivienda social calefaccionada con leña, será casi imposible mejorar la vivienda al nivel del estándar, con los recursos económicos entregados hoy en día. Sin duda, pensamos que los usuarios de viviendas sociales, podrían obtener el estándar, con todo lo que ello implica respecto a aumentar la calidad de vida y un aumento del confort interior y sin tener gastos elevados en energía, sólo si se obtiene un subsidio adicional por este tipo de casas, como ocurre, por ejemplo en Alemania.

Con un aumento en la demanda de edificaciones energéticamente eficientes en el mercado nacional, bajarán en el futuro probablemente los costos de los componentes necesarios para lograr el estándar, como se puede observar lo que ocurrió en Alemania. Allá, actualmente,

se puede conseguir una ventana con un triple vidriado hermético por el mismo precio de una con doble vidriado hermético. Con una reducción de los costos de inversión inicial, aumentará la rentabilidad del estándar.

Se mostró en el capítulo 6, que un mejoramiento de la eficiencia energética a través de un mayor nivel de aislación térmica, en general es rentable por su bajo costo y su alto potencial en ahorro energético. Un sistema de ventilación con recuperación de calor es rentable en la mayoría de los casos en Concepción y Puerto Montt, mientras que, en Santiago sólo en la mitad de los casos, dado que, el ahorro energético que ofrece este sistema en un clima moderado no compensa los costos de inversión inicial.

Desde el punto de vista de la rentabilidad, un argumento en contra del estándar Passivhaus en Chile es la exigencia de las temperaturas superficiales interiores, ya que, no deben ser menores a los 17°C. Esta exigencia no se puede lograr en los climas de Santiago, Concepción y Puerto Montt con ventanas termopaneles comunes, lo que significa, para el cumplimiento del estándar, que hay que instalar un doble vidriado hermético con una capa de baja emisividad y un relleno con gas argón como descrito en el capítulo 3. Estos tipos de ventanas tienen hoy en día un costo de inversión inicial elevado en comparación a ventanas termopaneles comunes, por lo tanto, no se puede recuperar esta diferencia en costos a través del ahorro en gastos energéticos durante la vida útil de las ventanas. No obstante, se mostró, que el “producto” Passivhaus en su totalidad, incluyendo las ventanas mejoradas, es rentable, pero no necesariamente la mejor opción desde el punto de vista de la rentabilidad. Las soluciones con la mejor rentabilidad mostraron una demanda energética total de aproximadamente 30 kWh/(m²a) lo que es el doble del criterio del estándar Passivhaus y todos estos casos cuentan con ventanas termopaneles comunes.

Se concluye, que el estándar Passivhaus es sin embargo UNA NUEVA OPORTUNIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE PARA EL CENTRO-SUR DE CHILE. El estándar Passivhaus es un estándar energético de excelencia y uno de los más exigentes a nivel mundial, por lo tanto, un aporte importante para mejorar la sustentabilidad de las edificaciones en Chile. Sin embargo será difícil implementar el estándar, en una primera etapa, en todas las clases de edificaciones por su inversión inicial más elevada. Para superar este obstáculo sería ideal obtener un incentivo de parte del Estado y por otra parte es indispensable aumentar la difusión de información acerca de la eficiencia energética en la construcción. Sólo si existe un conocimiento y una conciencia en el país, de que es necesario y conveniente ahorrar energía, las personas estarán dispuestas a invertir capital para mejorar su edificación energéticamente.

7.3 Fortalezas y debilidades del trabajo realizado

- **Fortalezas:**

Una de las fortalezas del estudio es su carácter global y generalizado a través de la metodología del análisis paramétrico. Se analizaron con esta metodología más que 20.000 casos y no como se hace comúnmente, donde se analizan sólo algunos casos de estudio. La ventaja de ello es, poder estudiar la interacción de distintos parámetros en conjunto y no por separado.

Una segunda fortaleza es la integración total del análisis económico en el estudio paramétrico. A través de esta integración se puede analizar la influencia de cualquier cambio de un parámetro en la demanda energética y simultáneamente su rentabilidad. Generalmente, los estudios se enfocan, por su complejidad, sólo en una de las dos partes y dejan la otra parte de lado.

- **Debilidades**

La parte del análisis económico depende de los precios considerados, por ejemplo los precios de las ventanas o los precios para la energía. Estos precios pueden cambiar en un corto plazo, es decir, en un periodo de algunos años, por lo tanto, el análisis económico tiene validez mientras no haya un cambio significativo de los precios considerados.

7.4 Trabajos futuros, líneas de investigación

Durante la ejecución del estudio surgieron varios temas y líneas de investigación para el futuro, lo cual demuestra que el tema de este trabajo es un tema importante y todavía abierto, no completamente investigado nacional e internacionalmente. Algunos de estos temas son:

- Análisis y verificación de la validez de los resultados de simulaciones térmicas para casas Passivhaus en Chile a través del monitoreo de futuros casos construidos.
- Análisis de la factibilidad de implementar el estándar Passivhaus en todos los estratos socioeconómicos y cuál será el impacto social/económico para el país al implementar el estándar obligatoriamente en las viviendas sociales.
- Análisis de la factibilidad de implementar el estándar Passivhaus en todo Chile. Ampliar el estudio a las ciudades del norte y en el extremo sur e igualmente a la zona andina.

- Análisis de la factibilidad de aplicar el estándar Passivhaus en Chile en edificaciones de un uso distinto a la vivienda como colegios, oficinas, hospitales, gimnasios, edificios de departamentos.
- Análisis del impacto de distintos niveles de la hermeticidad en el desempeño de edificaciones Passivhaus en Chile.
- Análisis de la factibilidad de lograr a partir del estándar Passivhaus edificios de cero consumo energético en Chile.
- Análisis del ciclo de vida (LCA) de edificaciones Passivhaus en Chile para mostrar su impacto medioambiental.
- Investigar cual puede ser un estándar óptimo entre eficiencia energética y rentabilidad en Chile.
- Implementar un sistema de certificación del estándar Passivhaus en Chile.
- Adaptar el software PHPP y su archivo de datos climáticos para Chile con el fin de poder calcular las demandas energéticas y certificar las edificaciones Passivhaus a través del mismo proceso como en Europa central.
- Difusión del estándar Passivhaus en Chile.

LISTADOS DE
ILUSTRACIONES
Y
TABLAS

LISTADOS DE
ILUSTRACIONES
Y TABLAS

Listado de Ilustraciones

Ilustración 1-1:	Mapa de radiación solar en kWh/m ² d (Fuente: http://www.ayre.com.mx/tecnosolar/energia_solar.html).	28
Ilustración 1-2:	Tramos de temperatura operativa medida en las viviendas por ciudad en invierno (Campos, 2008).....	32
Ilustración 1-3:	Tramos de temperatura operativa medida en las viviendas por ciudad en verano (Campos, 2008).	33
Ilustración 1-4:	PIB y consumo energético en comparación entre Chile y países OECD (SERNAC-CNE, 2005).	35
Ilustración 1-5:	Consumo energético por sector (Gobierno de Chile PPEE, 2006).	35
Ilustración 1-6:	Distribución consumo energía a nivel residencial, total país según (CDT et al., 2010).	35
Ilustración 1-7:	Consumo de energía para escenario actual, en orden de latitud y diferentes tipologías (Ambiente Consultores, 2007).....	36
Ilustración 1-8:	Reducción del consumo energético de edificaciones en Alemania con la implementación de estándares energéticos y con un aumento de las exigencias durante los años (elaboración propia).....	42
Ilustración 1-9:	Directiva de la Unión Europea para establecer el estándar de casi cero-energía en edificaciones para el año 2021 (DIRECTIVE 2010/31/EU, 2010).....	43
Ilustración 1-10:	Costos capitalizados en relación a la demanda energética en calefacción para Europa central (Feist, 2004).....	47
Ilustración 1-11:	Comparación de la demanda energética en calefacción calculada entre edificaciones de referencia, construidas según las reglamentaciones nacionales, y edificaciones Passivhaus (Feist et al., 2001).	50
Ilustración 1-12:	Países con miembros en la asociación internacional de Passivhaus en el año 2010 (Feist, 2010).	52
Ilustración 1-13:	Crecimiento del mercado de las casas Passivhaus en el ejemplo de Austria entre los años 1995 a 2006 (Elswijk et al., 2008).....	53

Ilustración 2-1:	Procedimiento para el cálculo de la demanda y la carga térmica con PHPP (ENERGIEHAUS, 2009).....	72
Ilustración 2-2:	Comparación entre valores reales, valores calculados con PHPP y valores teóricos de una edificación tradicional (Schnieders and Hermelink, 2006).	73
Ilustración 2-3:	Comparación entre los resultados de la simulación térmica con EnergyPlus y los valores del monitoreo según (O'Brien, et al., 2010) en una casa con un bajo consumo energético.	75
Ilustración 2-4:	Modelo de simulación para comparar resultados entre E+ y PHPP (elaboración propia).....	79
Ilustración 2-5:	Sistema de ventilación con calefactor de aire para una vivienda unifamiliar (Feist et al., 2005b).....	79
Ilustración 2-6:	Comparación de la demanda energética entre los resultados de EnergyPlus “Ideal Load Air HVAC System” y PHPP para el caso de validación en Múnich (elaboración propia).....	81
Ilustración 2-7:	Comparación de la demanda energética en calefacción entre los resultados de EnergyPlus “Ideal Load Air HVAC System” y PHPP para el caso de validación en Múnich, Puerto Montt, Concepción y Santiago (elaboración propia).....	83
Ilustración 2-8:	Comparación de la demanda energética en refrigeración entre los resultados de EnergyPlus “Ideal Load Air HVAC System” y PHPP para el caso de validación en Múnich, Puerto Montt, Concepción y Santiago (elaboración propia).....	84
Ilustración 2-9:	Esquema del proceso de la automatización de las simulaciones entre el programa de simulación térmica y GenOpt (Wetter, 2009).....	87
Ilustración 2-10:	Flujo del proceso del estudio paramétrico multifactorial (elaboración propia).....	88
Ilustración 3-1:	Mecanismos de transferencia de calor en un recinto (Bustamante, et al., 2009).	92
Ilustración 3-2:	Esquema de una casa Passivhaus con sus elementos y parámetros típicos (Ruiz de Gauna, 2012).	94
Ilustración 3-3:	Valor U máximo permitido para cumplir el criterio de confort en relación con la temperatura ambiental interior y la temperatura exterior (elaboración propia).....	97

Ilustración 3-4:	Riesgo de condensación superficial y crecimiento de moho según (NCh1973 of, 2008) (elaboración propia).....	98
Ilustración 3-5:	Valores típicos de U_g para sistemas de vidrio, los cuales dependen del vidrio, del gas en la cámara y de los números de capas de baja emisividad (Gustavsen and Jelle, 2007).	109
Ilustración 3-6:	Porcentaje máximo de superficie vidriada respecto a paramentos verticales de la envolvente (MINVU, 2006).....	116
Ilustración 3-7:	Exigencias de acondicionamiento térmico por zonas térmicas (MINVU, 2006).....	118
Ilustración 3-8:	Muro de ladrillo macizo con aislación térmica y estuco (MINVU, 2006).	119
Ilustración 3-9:	Techumbre con vigas de madera con aislación térmica (MINVU, 2006).	119
Ilustración 3-10:	Diagrama de árbol de los parámetros y sus niveles (elaboración propia).....	121
Ilustración 4-1:	Porcentaje de los casos de estudio que cumplieron los criterios del estándar Passivhaus en distintos climas (elaboración propia).	126
Ilustración 4-2:	Porcentaje de la influencia del cambio de niveles de los distintos parámetros estudiados, para lograr el estándar Passivhaus en tres diferentes climas: Santiago, Concepción, Puerto Montt (elaboración propia).	130
Ilustración 4-3:	Porcentaje de la influencia del cambio del nivel de los distintos parámetros estudiados para lograr el estándar Passivhaus en Santiago, ordenado del parámetro menos importante al más importante (elaboración propia).	131
Ilustración 4-4:	Porcentaje de la influencia del cambio del nivel de los distintos parámetros estudiados para lograr el estándar Passivhaus en Concepción, ordenado del parámetro menos importante al más importante (elaboración propia).	132
Ilustración 4-5:	Porcentaje de la influencia del cambio del nivel de los distintos parámetros estudiados para lograr el estándar Passivhaus en Puerto Montt, ordenado del parámetro menos importante al más importante (elaboración propia).....	133

Ilustración 4-6:	Influencia de los parámetros investigados en la diferencia de la demanda energética total (refrigeración + calefacción) en tres climas diferentes: Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).....	141
Ilustración 4-7:	Diferencia en la demanda energética entre los casos de estudio que lograron el estándar Passivhaus y sus casos de referencia según reglamentación térmica RT en [kWh/(m ² a)] (Fuente: elaboración propia).....	150
Ilustración 4-8:	Demanda energética en la suma de calefacción y refrigeración de las casas Passivhaus versus los casos de referencia [kWh/(m ² a)] en tres ubicaciones distintas (elaboración propia).	151
Ilustración 4-9:	Demanda energética en calefacción de las casas Passivhaus versus los casos de referencia [kWh/(m ² a)] en tres ubicaciones distintas (elaboración propia).....	152
Ilustración 4-10:	Demanda energética en refrigeración de las casas Passivhaus versus los casos de referencia [kWh/(m ² a)] en tres ubicaciones distintas (elaboración propia).....	153
Ilustración 4-11:	Árbol de decisiones para el proceso de diseño de casas de baja demanda energética en Santiago con la variable de respuesta: Q total promedio [kWh/(m ² a)] (elaboración propia).....	162
Ilustración 4-12:	Árbol de decisiones para el proceso de diseño de casas de baja demanda energética en Concepción con la variable de respuesta: Q total promedio [kWh/(m ² a)] (elaboración propia).....	163
Ilustración 4-13:	Árbol de decisiones para el proceso de diseño de casas de baja demanda energética en Puerto Montt con la variable de respuesta: Q total promedio [kWh/(m ² a)] (elaboración propia).....	165
Ilustración 5-1:	Alcance de la influencia sobre los costos del ciclo de vida durante el tiempo (ISO 15686-5:, 2008).	171
Ilustración 5-2:	Esquema de los costos del ciclo de vida según (ISO 15686-5:, 2008)....	174
Ilustración 5-3:	Esquema del análisis de los costos del ciclo de vida aplicado en el presente estudio según (Morrissey and Horne, 2011).	177
Ilustración 5-4:	Grafico IPC Chile a largo plazo (fuente: http://es.global-rates.com/estadisticas-economicas /inflacion/indice-de-precios-al-consumo/ipc/chile.aspx).	191

Ilustración 5-5: Parámetros que definen las certificaciones energéticas y relación entre demanda energética y consumo energético. Fuente (Hernández and Meza, 2011).....	197
Ilustración 5-6: Sistema de ventilación con calefactor de aire para una vivienda unifamiliar (Feist, et al., 2005b).....	201
Ilustración 6-1: Costos de inversión IC de los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt en relación a la demanda energética total (En base a una vivienda de 2500 UF, 100 m ² de superficie útil) (elaboración propia).....	209
Ilustración 6-2: Diferencia en los costos de inversión (dIC) entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).....	210
Ilustración 6-3: Distribución desglosada de la diferencia promedio de los costos de inversión entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).	211
Ilustración 6-4: Costos de operación OC capitalizados de los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt en relación a la demanda energética total (Tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).....	213
Ilustración 6-5: Diferencia en los costos de operación capitalizados (dOC) entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt (Tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).	214
Ilustración 6-6: Promedio de los costos anuales de la operación de los casos que cumplieron el estándar Passivhaus (CP) y sus respectivos casos de referencia (RT) (elaboración propia).	215
Ilustración 6-7: Diagrama de los costos del ciclo de vida de una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con los valores promedios en el ejemplo de Concepción (Tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).	217

Ilustración 6-8:	Diferencia de los costos del ciclo de vida capitalizados dLCC de los casos de estudio y sus casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt en relación a la demanda energética total (Tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).....	218
Ilustración 6-9:	Diferencia en los costos del ciclo de vida capitalizados (dLCC) entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt (Tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).....	219
Ilustración 6-10:	Influencia de los distintos niveles de los parámetros a la diferencia en los costos del ciclo de vida (dLCC) entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).....	221
Ilustración 6-11:	Costos de inversión, costos del ciclo de vida y periodo de recuperación de la inversión inicial separados por parámetro y nivel en Santiago (elaboración propia).....	223
Ilustración 6-12:	Costos de inversión, costos del ciclo de vida y periodo de recuperación de la inversión inicial separados por parámetro y nivel en Concepción (elaboración propia).....	224
Ilustración 6-13:	Costos de inversión, costos del ciclo de vida y periodo de recuperación de la inversión inicial separados por parámetros y niveles en Puerto Montt (elaboración propia).....	226
Ilustración 6-14:	Periodo de recuperación de la inversión inicial más elevada de los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt en relación a la demanda energética total (Tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).....	228
Ilustración 6-15:	Periodo de recuperación de la inversión inicial más elevada de los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia en Santiago, Concepción y Puerto Montt (Tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).....	229
Ilustración 6-16:	Costos anuales promedios de las casas Passivhaus (CP) y sus respectivos casos de referencia (RT) en Concepción durante los años financiados a través de un crédito hipotecario (En base de una	

	vivienda de 2500 UF (RT), 100 m ² superficie útil, tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).....	230
Ilustración 6-17:	Variación de la diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC entre una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con los valores promedios en el ejemplo de Concepción con el cambio del aumento del precio de la energía (Tasa real 5.13% anual, elaboración propia).....	234
Ilustración 6-18:	Gráfico de los costos del ciclo de vida de una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con distintos sistemas de calefacción (valores promedios en el ejemplo de Concepción, Tasa real 5.13% anual, 1.7% aumento anual del precio de energía, elaboración propia).....	236
 <u>Anexos</u>		
Ilustración A-1:	% Máximo de superficie vidriada respecto a paramentos verticales de la envolvente (MINVU, 2006).....	284
Ilustración A-2:	Muro de ladrillo macizo con aislación térmica y estuco (MINVU, 2006).	286
Ilustración A-3:	Techumbre con vigas de madera con aislación térmica (MINVU, 2006).	286
Ilustración B-1:	Diferencia en la demanda energética total para los casos que cumplieron el estándar Passivhaus por parámetros en todas las ciudades juntas (elaboración propia).	300
Ilustración B-2:	Diferencia en la demanda energética total para los casos que cumplieron el estándar Passivhaus por parámetros separados por ciudades Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).	301
Ilustración C-1:	Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia en los costos de inversión dIC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no (elaboración propia).....	304
Ilustración C-2:	Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia en los costos de inversión dIC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no	

	para Santiago, Concepción y Puerto Montt ordenado por influencia (elaboración propia).....	306
Ilustración C-3:	Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia de los costos de operación dOC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no (elaboración propia).....	307
Ilustración C-4:	Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia de los costos de operación dOC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no en Santiago, Concepción y Puerto Montt ordenado por influencia (elaboración propia).....	309
Ilustración C-5:	Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia de los costos del ciclo de vida dLCC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no en Santiago, Concepción y Puerto Montt ordenado por influencia (elaboración propia).....	311
Ilustración C-6:	Influencia de los parámetros y sus niveles en el periodo de la recuperación de la inversión inicial de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar o no en Santiago, Concepción y Puerto Montt ordenado por influencia (elaboración propia).....	313
Ilustración C-7:	Costos anuales promedios de las casas Passivhaus (CP) y sus casos de referencia respectivos (RT) en Santiago durante los años financiado a través de un crédito hipotecario (En base de una vivienda de 2500 UF (RT), 100 m ² superficie útil, tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).....	314
Ilustración C-8:	Costos anuales promedios de las casas Passivhaus (CP) y sus casos de referencia respectivos (RT) en Concepción durante los años financiado a través de un crédito hipotecario (En base de una vivienda de 2500 UF (RT), 100 m ² superficie útil, tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).....	314
Ilustración C-9:	Costos anuales promedios de las casas Passivhaus (CP) y sus casos de referencia respectivos (RT) en Puerto Montt durante los años	

financiado a través de un crédito hipotecario (En base de una vivienda de 2500 UF (RT), 100 m ² superficie útil, tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).....	315
Ilustración C-10: Variación de la diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC entre una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con los valores promedios en el ejemplo de Santiago con el cambio del aumento del precio de la energía (Tasa real 5.13% anual, elaboración propia).....	317
Ilustración C-11: Variación de la diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC entre una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con los valores promedios en el ejemplo de Concepción con el cambio del aumento del precio de la energía (Tasa real 5.13% anual, elaboración propia).....	317
Ilustración C-12: Variación de la diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC entre una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con los valores promedios en el ejemplo de Puerto Montt con el cambio del aumento del precio de la energía (Tasa real 5.13% anual, elaboración propia).....	318
Ilustración C-13: Gráfico de los costos del ciclo de vida de una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con distintos sistemas de calefacción (valores promedios en el ejemplo de Santiago, Tasa real 5.13% anual, 1.7% aumento anual del precio de energía, elaboración propia).....	318
Ilustración C-14: Gráfico de los costos del ciclo de vida de una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con distintos sistemas de calefacción (valores promedios en el ejemplo de Concepción, Tasa real 5.13% anual, 1.7% aumento anual del precio de energía, elaboración propia).....	319
Ilustración C-15: Gráfico de los costos del ciclo de vida de una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con distintos sistemas de calefacción (valores promedios en el ejemplo de Puerto Montt, Tasa real 5.13% anual, 1.7% aumento anual del precio de energía, elaboración propia).....	319

Listado de Tablas

Tabla 1-1:	Tendencia de los factores climatológicos a lo largo y ancho de Chile (Bustamante, et al., 2009).	26
Tabla 1-2:	Grados-día anuales según zona térmica RT (MINVU, 2006).	27
Tabla 1-3:	Escala internacional para la evaluación del confort térmico en verano e invierno (según ISO 7730 y ASHRAE 55).	30
Tabla 1-4:	Dependencia energética del año 2008 en Chile en Teracalorías (Comisión Nacional de Energía, 2008).	34
Tabla 1-5:	Valores U máximos permitidos por zona según la Reglamentación térmica (MINVU, 2006).	39
Tabla 1-6:	Objetivos para cada clase de la certificación según (Fissore and Colonelli, 2009).	40
Tabla 1-7:	Calificación Energética- Indicador de Demanda de Energía (Fissore and Colonelli, 2009).	41
Tabla 1-8:	Número de viviendas construidas anualmente, superficie útil y precio promedio separado por tipo de vivienda en el lapso 1995-2004 (Fuente: INE, 2004).	59
Tabla 1-9:	Condiciones bordes para el estándar Passivhaus en Chile en el marco del presente estudio (elaboración propia).	64
Tabla 2-1:	Comparación de algunas propiedades de programas de simulación térmicas versus métodos simplificados (elaboración propia).	71
Tabla 2-2:	Condiciones borde para el cálculo del comportamiento energético (elaboración propia).	80
Tabla 2-3:	Valores U de la envolvente y tipo de vidrio según ubicación climática utilizados en la comparación de PHPP y EnergyPlus (elaboración propia).	83
Tabla 3-1:	Parámetros elegidos para analizar su impacto en el marco del estudio multifactorial (elaboración propia).	95
Tabla 3-2:	Valores U máximos para evitar crecimiento de moho (elaboración propia).	98

Tabla 3-3:	Determinación de los valores U máximo para cumplir el criterio de confort y el criterio de higiene en 4 ciudades diferentes para elementos verticales como ventanas (elaboración propia).....	99
Tabla 3-4:	Niveles del parámetro ubicación y la clasificación de las tres ciudades elegidas según reglamentación térmica y NCh. 1079 of 2008 (elaboración propia).....	101
Tabla 3-5:	Niveles del parámetro orientación (elaboración propia).	101
Tabla 3-6:	Distintas formas de casas aisladas con sus factores forma (elaboración propia).....	102
Tabla 3-7:	Factor forma y consumo en energía para calefacción y refrigeración (elaboración propia).....	103
Tabla 3-8:	Niveles del parámetro geometría (elaboración propia).....	103
Tabla 3-9:	Niveles del parámetro superficies de las ventanas al este igual que al oeste de 15% y 40% y su distribución geométrica en las dos formas investigadas (elaboración propia).	104
Tabla 3-10:	Niveles del parámetro superficies de las ventanas al norte de 15%, 40% y 70% y su distribución geométrica en las dos formas investigadas (elaboración propia).	105
Tabla 3-11:	Niveles del parámetro alero norte (elaboración propia).....	106
Tabla 3-12:	Niveles del parámetro sombra temporal en verano de la superficie vidriada al este y oeste (elaboración propia).....	107
Tabla 3-13:	Niveles del parámetro tipo de ventanas y de elementos vidriados (elaboración propia).....	110
Tabla 3-14:	Niveles del parámetro transmitancia térmica de los elementos de la envolvente a variar en el estudio (elaboración propia).....	111
Tabla 3-15:	Niveles del parámetro “inercia térmica” de elementos opacos de la envolvente (elaboración propia).....	112
Tabla 3-16:	Calendario de recuperación de calor y del bypass del intercambiador de calor (elaboración propia).	113
Tabla 3-17:	Niveles del parámetro del sistema de ventilación con o sin recuperación de calor (elaboración propia).....	113
Tabla 3-18:	Niveles del parámetro intercambiador de calor subsuelo-aire (elaboración propia).....	114

Tabla 3-19:	Posibles configuraciones de las superficies vidriadas de los casos de referencia y los valores U máximos correspondientes según RT (elaboración propia).....	117
Tabla 3-20:	Tipo de vidrios utilizados para los casos de referencia (elaboración propia).....	118
Tabla 4-1:	Resumen de los casos de estudio y su clasificación en grupos que cumplieron con los requisitos del estándar Passivhaus y grupos que no cumplieron en cantidad y porcentaje (elaboración propia).	125
Tabla 4-2:	Resumen de las horas por año heating and cooling setpoint not met en Santiago, Concepción y Puerto Montt y la extracción de los casos Passivhaus (elaboración propia).....	127
Tabla 4-3:	Influencia de los parámetros y sus niveles para lograr el estándar Passivhaus. El valor porcentual describe que porcentaje de los casos, que lograron el estándar Passivhaus corresponden a cada nivel de cada parámetro (elaboración propia).....	128
Tabla 4-4:	Términos para el análisis de la demanda energética (elaboración propia).....	134
Tabla 4-5:	Demanda energética en calefacción y refrigeración separada en casos que cumplieron y no cumplieron el estándar Passivhaus en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).	135
Tabla 4-6:	Demanda energética de todos los casos de estudio versus los casos que cumplen con el estándar Passivhaus en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).	137
Tabla 4-7:	Influencia de los parámetros y sus niveles en la demanda energética total (suma calefacción y refrigeración) de todos los casos de estudio independiente que cumplen con el estándar Passivhaus o no (elaboración propia).....	139
Tabla 4-8:	Resumen de la demanda energética de todos los casos de estudio en Santiago. La tabla muestra los valores: cantidad, media, varianza, desviación estándar, máximo y mínimo para la demanda energética total, de refrigeración y de calefacción (elaboración propia).	142
Tabla 4-9:	Influencia de los parámetros investigados en la diferencia de la demanda energética en Santiago, separado por demanda energética total, de refrigeración y de calefacción (elaboración propia).	143

Tabla 4-10:	Influencia de los parámetros investigados en la diferencia de la demanda energética en Concepción separado por demanda energética total, de refrigeración y de calefacción (elaboración propia).....	145
Tabla 4-11:	Resumen de la demanda energética de todos los casos de estudio en Concepción. La tabla muestra los valores: cantidad, media, varianza, desviación estándar, máximo y mínimo para la demanda energética total, de refrigeración y de calefacción (elaboración propia).....	146
Tabla 4-12:	Resumen de la demanda energética de todos los casos de estudio en Puerto Montt. La tabla muestra los valores: cantidad, media, varianza, desviación estándar, máximo y mínimo para la demanda energética total, de refrigeración y de calefacción (elaboración propia).....	147
Tabla 4-13:	Influencia de los parámetros investigados en la diferencia de la demanda energética en Puerto Montt separado por demanda energética total, de refrigeración y de calefacción (elaboración propia).....	148
Tabla 4-14:	Valores promedios de la diferencia en la demanda energética total, de calefacción y de refrigeración entre los casos que cumplen con el estándar Passivhaus y sus casos de referencia (elaboración propia).....	150
Tabla 4-15:	Demanda energética mínima de los casos con la mejor combinación de los niveles de los parámetros para Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).....	154
Tabla 4-16:	Demanda energética máxima de los casos con la peor combinación de los niveles de los parámetros para Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).....	156
Tabla 4-17:	Resumen del análisis del rendimiento del sistema de ventilación considerando Si y No la recuperación de calor en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).	158
Tabla 5-1:	Nomenclatura para el cálculo de LCC (elaboración propia).	177
Tabla 5-2:	Determinación de la influencia de los parámetros constructivos y sus niveles diferentes al precio de la construcción (elaboración propia).....	184

Tabla 5-3:	Determinación de la influencia de los parámetros de los equipos de climatización y sus niveles diferentes al precio de la construcción (elaboración propia).....	186
Tabla 5-4:	Determinación del sistema de calefacción para los casos de estudio y sus casos de referencia (elaboración propia).	187
Tabla 5-5:	Determinación del sistema de refrigeración para los casos de estudio y sus casos de referencia (elaboración propia).....	187
Tabla 5-6:	Precios de energía estimados según (CDT et al., 2010) por agrupación de zonas térmicas.....	192
Tabla 5-7:	Precios de energía estimados según (CDT et al., 2010) por agrupación de zonas térmicas con la conversión entre UF y pesos Chilenos con el curso de 16.12.2011 (elaboración propia).	193
Tabla 5-8:	Precios de energía utilizados en el presente estudio en pesos/kWh según (CDT et al., 2010) (elaboración propia).....	193
Tabla 5-9:	Vida útil normal de construcciones y casas en ladrillo, hormigón y madera (Servicio de Impuestos Internos, 2003).	194
Tabla 5-10:	Vida útil de tipos de estructura en Chile según (OLATE, 2008).	194
Tabla 5-11:	Resumen de las condiciones bordes para los cálculos de la rentabilidad (elaboración propia).	196
Tabla 5-12:	Rendimiento de diferentes equipos (elaboración propia).	198
Tabla 5-13:	Equipos de climatización para diferentes configuraciones de las casas con rendimiento y precio de energía (elaboración propia).	200
Tabla 5-14:	Resumen del consumo de energía auxiliar del sistema de ventilación y del intercambiador de calor tierra-aire para los casos de estudio (elaboración propia).....	203
Tabla 6-1:	Promedio y desviación estándar de la diferencia en los costos de inversión (dIC) entre los casos Passivhaus (CP) y sus casos de referencia (RT) (elaboración propia).....	208
Tabla 6-2:	Promedio y desviación estándar de la diferencia en los costos de operación capitalizados (dOC) entre los casos Passivhaus (CP) y sus respectivos casos de referencia (RT) en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).	215

Tabla 6-3:	Promedio y desviación estándar de los costos de operación anual (OC) entre los casos Passivhaus (CP) y sus respectivos casos de referencia (RT) en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).....	216
Tabla 6-4:	Promedio y desviación estándar de la diferencia en los costos del ciclo de vida capitalizados (dLCC) entre los casos Passivhaus (CP) y sus respectivos casos de referencia (RT) en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).....	220
Tabla 6-5:	Promedio y desviación estándar del periodo de recuperación de la inversión inicial más elevada de los casos Passivhaus (CP) y sus respectivos casos de referencia (RT) en Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).....	227
Tabla 6-6:	Diferencia en los costos del ciclo de vida entre los casos de estudio y sus respectivos casos de referencia del 10% de los casos con la mejor rentabilidad con su combinación de los niveles de los parámetros para Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).....	232
Tabla 6-7:	Distintas opciones del tipo del sistema de calefacción para los casos de referencia con el rendimiento, precio de la energía utilizada, costo estimado de la instalación del sistema y la diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC en relación a una casa Passivhaus (elaboración propia).....	235

Anexos

Tabla A-1:	Muros exteriores con el espesor de la aislación térmica variable (elaboración propia).....	282
Tabla A-2:	Techumbres con el espesor de la aislación térmica variable (elaboración propia).....	282
Tabla A-3:	Composición del radier con el espesor de la aislación térmica variable (elaboración propia).....	282
Tabla A-4:	Resistencias térmicas de las diferentes capas de la construcción (elaboración propia).....	283
Tabla A-5:	Espesor de la aislación térmica para cumplir un valor U definido en los muros (elaboración propia).....	283

Tabla A-6:	Espesor de la aislación térmica para cumplir un valor U definido en las techumbres (elaboración propia).....	283
Tabla A-7:	Propiedades térmicas de diferentes elementos en la construcción según (NCh. 853 of. 2007).	283
Tabla A-8:	Superficie total de los elementos muros de las dos geometrías (elaboración propia).....	285
Tabla A-9:	% Superficie vidriada de los casos de referencia y los valores U correspondientes de las ventanas (elaboración propia).	285
Tabla A-10:	Tipos de vidrio utilizados en los casos de referencia (elaboración propia).....	285
Tabla A-11:	Composición de los muros exteriores y de las techumbres con el espesor de la aislación térmica variable (elaboración propia).	286
Tabla A-12:	Resistencias térmicas de las diferentes capas de la construcción del caso de referencia (elaboración propia).....	286
Tabla A-13:	Espesor de la aislación térmica para cumplir un valor U definido por zona térmica para los muros y techumbres de los casos de referencia (elaboración propia).....	287
Tabla B-1:	Resumen estadístico de la demanda energética total de todos los casos de estudio en Santiago (elaboración propia).	288
Tabla B-2:	Resumen estadístico de la demanda energética en refrigeración de todos los casos de estudio en Santiago (elaboración propia).	289
Tabla B-3:	Resumen estadístico de la demanda energética en calefacción de todos los casos de estudio en Santiago (elaboración propia).	290
Tabla B-4:	Resumen estadístico de la demanda energética total de todos los casos de estudio en Concepción (elaboración propia).....	291
Tabla B-5:	Resumen estadístico de la demanda energética en refrigeración de todos los casos de estudio en Concepción (elaboración propia).....	292
Tabla B-6:	Resumen estadístico de la demanda energética en calefacción de todos los casos de estudio en Concepción (elaboración propia).....	293
Tabla B-7:	Resumen estadístico de la demanda energética total de todos los casos de estudio en Puerto Montt (elaboración propia).	294
Tabla B-8:	Resumen estadístico de la demanda energética en refrigeración de todos los casos de estudio en Puerto Montt (elaboración propia).	295

Tabla B-9:	Resumen estadístico de la demanda energética en calefacción de todos los casos de estudio en Puerto Montt (elaboración propia).	296
Tabla B-10:	Resumen estadístico de la demanda energética total para los casos que cumplieron el estándar Passivhaus en Santiago (elaboración propia).	297
Tabla B-11:	Resumen estadístico de la demanda energética total para los casos que cumplieron el estándar Passivhaus en Concepción (elaboración propia).	298
Tabla B-12:	Resumen estadístico de la demanda energética total para los casos que cumplieron el estándar Passivhaus en Puerto Montt (elaboración propia).	299
Tabla C-1:	Precios unitarios muros (elaboración propia).	302
Tabla C-2:	Precios unitarios de techumbres (elaboración propia).	302
Tabla C-3:	Precios unitarios de radier (elaboración propia).	303
Tabla C-4:	Precios unitarios de entepiso (elaboración propia).	303
Tabla C-5:	Precios unitarios de ventanas (elaboración propia).	303
Tabla C-6:	Precios unitarios de alero (elaboración propia).	303
Tabla C-7:	Precios unitarios elementos de sombra temporal (elaboración propia). ..	303
Tabla C-8:	Precios unitarios sistemas de climatización y varios (elaboración propia).	304
Tabla C-9:	Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia en los costos de inversión dIC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no (elaboración propia).	305
Tabla C-10:	Promedio de los costos de operación anual de los casos que cumplieron el estándar Passivhaus (CP) y sus casos de referencia respectivos (RT) (elaboración propia).	307
Tabla C-11:	Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia de los costos de operación dOC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no (elaboración propia).	308
Tabla C-12:	Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia de los costos del ciclo de vida dLCC de todos los casos de estudio	

	independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no (elaboración propia).....	310
Tabla C-13:	Influencia de los parámetros y sus niveles en el periodo de la recuperación de la inversión inicial de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar (elaboración propia).....	312
Tabla C-14:	10% de los casos con la mejor rentabilidad con su combinación de los niveles de los parámetros y la cantidad por nivel para Santiago (elaboración propia).....	315
Tabla C-15:	10% de los casos con la mejor rentabilidad con su combinación de los niveles de los parámetros y la cantidad por nivel para Concepción (elaboración propia).....	316
Tabla C-16:	10% de los casos con la mejor rentabilidad con su combinación de los niveles de los parámetros y la cantidad por nivel para Puerto Montt (elaboración propia).....	316

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

ADAMSON, B. 1992. Passive Climatisation of Residential Buildings in China. In LUND UNIVERSITY. Report TABK-92/3006,. 1992.

AMBIENTE CONSULTORES 2007. Programa de Inversión Pública para Fomentar el Reacondicionamiento Térmico del Parque Construido de Viviendas. In Resumen Ejecutivo: ETAPA 1. Preinversional para el Reacondicionamiento Térmico del Parque de Viviendas Existentes y ETAPA 2: Modelos de gestion. Ambiente Consultores Ltda. - PRIEN, Universidad de Chile., 2007.

ASHRAE 55 2003. ANSI/ASHRAE 55-2003: Thermal Enviromental Conditions for Human Occupancy. In AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. Atlanta, 2003.

ASHRAE 62 1999. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. In AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. Atlanta, 1999.

ASHRAE 90.1- 2004. Standard 90.1-2004 -- Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings In AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. Atlanta, 2004.

ASIA-PACIFIC-ECONOMIC-COOPERATION 2009. Revisión de expertos sobre la eficiencia energética en Chile. In.: Asia-Pacific-Economic-Cooperation, 2009.

ASTM E917 - 05 2010. Standard Practice for Measuring Life-Cycle Costs of Buildings and Building Systems. In. West Conshohocken, PA, : ASTM International, 2010.

BOURISLI, R.I. AND ALANZI, A.A. 2011 Closed-Form Correlation of Buildings Energy Use With Key Design Parameters Calibrated Using a Genetic Algorithm. Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme, Nov 2011, vol. 133, no. 4.

BUSTAMANTE, W., ROZAS, Y., CEPEDA, R., ENCINAS, F. AND MARTÍNEZ, P. 2009. Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social. In MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO DIVISIÓN TÉCNICA DE ESTUDIO Y FOMENTO HABITACIONAL (MINVU) Y PROGRAMA PAÍS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA (CNE). Santiago de Chile, 2009.

BUSTAMANTE, W.G. 2008. Análisis norma NCh. 1079 : Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico. In FOMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA (CNE/GTZ). Santiago de Chile, 2008.

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. In. Santiago de Chile, 2008.

CAMPOS, J.P.R. 2008. Determinacion de linea base "Anual" Para la evaluacion de la inversion en eficiencia energetica en el sector residencial invierno 2007 - Verano 2008. In PROYECTO FOMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA (CNE/GTZ). Santiago de Chile, 2008.

CARRASCO, J. AND KOKOGIANNAKIS, G. 2012 Feasibility of PassivHaus standards and alternative passive design on climatic zones of Chile - Determination of energy requirements with dynamic simulation. *Hábitat Sustentable*, 2012, vol. Vol. 2, N°. 1, , p. 59-71.

CDT, CORPORACIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LA CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN, ARQENERGÍA AND FEEDBACK 2010. Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial. In Programa País de Eficiencia Energética. Santiago de Chile: Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2010.

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA 2008. Balance nacional de energía BNE 2008. In.: Gobierno de Chile,, 2008.

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA 2012. Publicaciones y estudios. 2012, [cited 07.02. 2012]. Available from Internet:<http://www.cne.cl/cnewww/opencms/05_Public_Estudios/introduccion.html#;>.

CRAWLEY, D.B., HAND, J.W., KUMMERT, M. AND GRIFFITH, B.T. 2008 Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 2008, vol. 43, no. 4, p. 661-673.

CRESPO, J., SOTO, J., BENGEOA, A., NITSCH, B. AND ET. AL. 2011. Guía del estandar Passivhaus: Edificios de consumo energetico casi nulo. In FUNDACIÓN DE LA ENERGIA DE LA COMUNIDAD DE MADRID. Madrid, 2011.

DE MEULENAER, V., VAN DER VEKEN, J., VERBEECK, G. AND HENS, H. 2005. Comparison of measurements and simulations of a "Passive House". In Proceedings of the Ninth International IBPSA Conference,, Montréal Canada,2005.

DIN EN ISO 13790: 2008. Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling (ISO 13790:2008). In EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. 2008.

DIN V 4701-10: 2003. Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen: Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung. In DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. 2003.

DIRECTIVE 2010/31/EU 2010. DIRECTIVE 2010/31/EU of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). In OFFICIAL JOURNAL OF THE EUROPEAN UNION. THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION,, 2010, vol. L 153/13.

EBERT, M. AND BOHNENSCHÄFER, W. 2008. Vollkostenvergleich Heizsysteme: Informationen für Verbraucher vom IE Leipzig. In LEIPZIGER INSTITUT FÜR ENERGIE GMBH. Leipzig, 2008.

EISENHOWER, B., O'NEILL, Z., NARAYANAN, S., FONOBEROV, V.A. AND MEZIĆ, I. 2012 A methodology for meta-model based optimization in building energy models. *Energy and Buildings*, 2012, vol. 47, no. 0, p. 292-301.

ELSWIJK, M., KAAAN, H. AND BOER, B.D. 2008. European Embedding of Passive Houses. In Promotion of European Passive Houses (PEP-project),. 2008.

- ELLIS, P.G., GRIFFITH, B.T., LONG, N., TORCELLINI, P. AND CRAWLEY, D. 2006. Automated multivariate optimization tool for energy analysis. In SimBuild. Cambridge, MA, 2006, vol. Second, p. 42 - 48.
- EN ISO 7730 1995. Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit. In EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. 1995.
- ENERGYPLUS 2010. EnergyPlus Version 6.0.0 Build 023. [2010. Designers: THE BOARD OF TRUSTEES OF THE UNIVERSITY OF ILLINOIS AND THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA THROUGH ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY.
- ENEV2009 2008 Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV 2009) 2008.
- FANGER, P.O. 1970. Thermal Comfort. Analysis and Applications in Enviromental Engineering. In. USA: New York, 1970.
- FEIST, W. 1992. Bauvorbereitendes Forschungsprojekt Passive Häuser. In. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt,, 1992.
- FEIST, W. 2004 First Steps: What Can be a Passive House in Your Region with Your Climate? 2004.
- FEIST, W. 2005. Heizlast in Passivhäusern – Validierung durch Messungen. In. Darmstadt: Passivhaus Institut, 2005.
- FEIST, W. 2005. Passivhaus Definition. 2005, vol. aktualisiert: 16.09.2005, [cited 11.06. 2010]. Available from Internet:<http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Passivhaus_Definition.html>.
- FEIST, W. 2006. Geschichte Passivhaus. 2006, vol. 19.04.2010, no. 10:20:02. Available from Internet:<http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Geschichte_Passivhaus.html>.
- FEIST, W. 2006. Wirtschaftlichkeit Passivhaus. 2006, [cited 28.08 2009]. Available from Internet:<http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Wirtschaftlichkeit_Pass>.
- FEIST, W. 2010. 14-Internationale Passivhaus Tagung Zusammenfassende Folien. 2010.
- FEIST, W. 2012. 16 Internationale Passivhaustagung. In PASSIVHAUS INSTITUT DARMSTADT. Hannover, 2012.
- FEIST, W., KNISSEL, J. AND PFLUGER, R. 2005 Energieeffiziente Raumkühlung. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, 2005, vol. Protokollband Nr. 31.
- FEIST, W., PEPPER, S. AND GÖRG, M. 2001. CEPHEUS-Projectinformation No. 36, Final Technical Report. In., 2001, vol. No. 36, p. 20.
- FEIST, W., PFLUGER, R., KAUFMANN, B., SCHNIEDERS, J. AND KAH, O. 2007 Passivhaus Projektierungs Paket 2007, PHPP 2007. Passivhaus Institut Darmstadt, 2007, no. Fachinformation PHI-2007/1.

FEIST, W., RASCH, F. AND BRUCKER, J. 1997 Kostengünstiges Bauen mit Passivhäuser. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, 1997, vol. Protokollband Nr. 11.

FEIST, W., SCHNIEDERS, J., DORER, V. AND HAAS, A. 2005 Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. *Energy and Buildings*, Nov 2005, vol. 37, no. 11, p. 1186-1203.

FISSORE, A.S. AND COLONELLI, P.P.-C. 2009. Sistemas de certificación energética de viviendas. In IIT – INSTITUTO DE INVESTIGACIONES TECNOLÓGICAS Y ASISTENCIA TÉCNICA. – UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN. Concepción: Ministerio de vivienda y urbanismo,, 2009.

FORD, B., SCHIANO-PHAN, R. AND ZHONGCHENG, D. 2007. Der Passivhausstandard in europäischen, warmen Klimata: Gestaltungsrichtlinien für komfortable Niedrigstenergiehäuser Teil 1. Bericht über komfortable Niedrigstenergiehäuser. In.: Projekts Passive-on, EG, 2007, p. 43.

FORD, B., SCHIANO-PHAN, R. AND ZHONGCHENG, D. 2007. Der Passivhausstandard in europäischen, warmen Klimata: Gestaltungsrichtlinien für komfortable Niedrigstenergiehäuser Teil 3: comfort, climate and passive strategies. In.: Projekts Passive-on, EG, 2007, p. 53.

GABLER VERLAG 2012. Stichwort: Entscheidungsbaum. Gabler Wirtschaftslexikon [Type of Work]. 2012, vol. 7. Available from Internet:<<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/56443/entscheidungsbaum-v7.html>>.

GANTIOLER, G. 2010. Manual para la certificación “Estándar Passivhaus”. In CERTIFICADO Estándar Passivhaus Dr. Wolfgang Feist. PASSIV HAUS INSTITUT Dr. Wolfgang Feist, 2010.

GARDELLA, J.I. 2012 Cambio de sede del Santiago College: Estudio y deporte por fin juntos. En *Concreto*, 2012, vol. Mayo 2012 N°112, p. 22-28.

GLAUMANN, M., MALMQVIST, T., PEUPORTIER, B., WETZEL, C., SCARPELLINI, S., ZABALZA, I., GARAYO, S.D.D., STALLER, H., KRIGSVOLL, G., STOYKOVA, E., HORVÁTH, S., SZALAY, Z. AND DEGIOVANNI, V. 2010. Guidelines for LCA calculations in early design phases. In *Energy Saving through Promotion of Life Cycle Assessment in Buildings*. 2010, vol. Deliverable D3 Version 2010-03-30.

GOBIERNO DE CHILE 2010. Chile primer país en Latinoamérica en aplicar sistema de certificación energética en viviendas. 2010, [cited 11.07. 2012]. Available from Internet:<<http://www.gob.cl/informa/2010/11/19/chile-primer-pais-en-latinoamerica-en-aplicar-sistema-de-certificacion-energetica-en-viviendas.htm>>.

GOBIERNO DE CHILE 2010. Decreto 66, Plan de prevención y descontaminación atmosférica para la región Metropolitana (PPDA). In MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA. Santiago de Chile, 2010, vol. 16-04-2010.

GOBIERNO DE CHILE 2011. Ordenanza general de urbanismo y construcciones. In MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO. Santiago de Chile, 2011.

GOBIERNO DE CHILE PPEE 2006. Programa País de eficiencia energética. In MINISTERIO DE ECONOMIA. 2006.

- GUERRERO HERRERA, M. AND INE 2003. Metodología de clasificación socioeconómica de los hogares chilenos. In C. DEPARTAMENTO DE METODOLOGÍA ESTADÍSTICA. 2003.
- GUSTAVSEN, A. AND JELLE, B.P. 2007. State-of-the-Art Highly Insulating Window Frames – Research and Market Review. In S.B.A. INFRASTRUCTURE. Trondheim Norwegian: University of Science and Technology, 2007, p. 84.
- HASAN, A., VUOLLE, M. AND SIRÉN, K. 2008 Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation. *Building and Environment*, 2008, vol. 43, no. 12, p. 2022-2034.
- HATT, T., SAELZER, G., HEMPEL, R. AND GERBER, A. 2012 Alto confort interior con mínimo consumo energético a partir de la implementación del estándar “Passivhaus” en Chile. *Revista De La Construcción*, 2012, vol. 11 Nº2,, p. 123-134.
- HATT, T., SAELZER, G., HEMPEL, R. AND GERBER, A. 2012. Passivhäuser in Zentral - Süd - Chile: Eine Parameterstudie. In *Proceedings of the Internationale Passivhaustagung, Hannover 2012*, W. FEIST Ed. Passivhaus Institut.
- HEIDT, F. 2006. Thermische Behaglichkeit aus IDEA Interaktive Datenbank Energieeffizienter Architektur. [Version for 2006/02. 2006. Designers: UNIVERSITÄT SIEGEN.
- HEMPEL, R., SAELZER, G. AND HATT, T. 2012. Proyecto FONDEF D09i1081: Desarrollo e introducción del sistema de edificación pasiva en Chile. In. Concepción: Universidad del Bío-Bío, 2012.
- HENNINGER, R.H. AND WITTE, M.J. 2010. EnergyPlus Testing with ASHRAE 1052-RP Toolkit – Building Fabric Analytical Tests. In. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy,, 2010.
- HENNINGER, R.H. AND WITTE, M.J. 2010. EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007. In. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy,, 2010.
- HENNINGER, R.H. AND WITTE, M.J. 2010. EnergyPlus Testing with Fuel-Fired Furnace Tests HE100 to HE230 from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007. In. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy,, 2010.
- HENNINGER, R.H. AND WITTE, M.J. 2010. EnergyPlus Testing with Global Energy Balance Test. In. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy,, 2010.
- HENNINGER, R.H. AND WITTE, M.J. 2010. EnergyPlus Testing with HVAC Equipment Component Tests. In. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy,, 2010.
- HENNINGER, R.H. AND WITTE, M.J. 2010. EnergyPlus Testing with HVAC Equipment Performance Tests CE100 to CE200 from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007. In. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy,, 2010.
- HENNINGER, R.H. AND WITTE, M.J. 2010. EnergyPlus Testing with HVAC Equipment Performance Tests CE300 to CE545 from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007. In. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy,, 2010.

HENNINGER, R.H. AND WITTE, M.J. 2010. EnergyPlus Testing with IEA BESTEST In-Depth Ground Coupled Heat Transfer Tests Related to Slab-on Grade Construction. In. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy,, 2010.

HENNINGER, R.H. AND WITTE, M.J. 2010. EnergyPlus Testing with IEA BESTEST Mechanical Equipment & Control Strategies for a Chilled Water and a Hot Water System. In. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy,, 2010.

HENNINGER, R.H. AND WITTE, M.J. 2010. EnergyPlus Testing with IEA BESTEST Multi-Zone Non-Airflow In-Depth Diagnostic Cases MZ320 – MZ360. In. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy,, 2010.

HERNÁNDEZ, H. AND MEZA, L. 2011 Propuesta de una metodología de certificación de eficiencia energética para viviendas en Chile. Revista De La Construcción, 2011, vol. N° 10, p. 53-63.

HERNANDEZ, P. AND KENNY, P. 2010 From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). Energy and Buildings, 2010, vol. 42, no. 6, p. 815-821.

HERNANDEZ, P. AND KENNY, P. 2011 Development of a methodology for life cycle building energy ratings. Energy Policy, 2011, vol. 39, no. 6, p. 3779-3788.

HUENCHUÑIR, M. 2011. Bank building in Santiago, Chile. In Proceedings of the 15 Internationale Passivhaustagung, Innsbruck2011, W. FEIST Ed. Passivhaus Institut Darmstadt, 265-270.

HYGH, J.S., DECAROLIS, J.F., HILL, D.B. AND RANJI RANJITHAN, S. 2012 Multivariate regression as an energy assessment tool in early building design. Building and Environment, 2012, vol. 57, no. 0, p. 165-175.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE) 2002 CENSO 2002 2002.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE) 2011. Índice de precios al consumidor (IPC) Hoja de cifras por canasta Noviembre 2011. In INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE). Santiago de Chile, 2011, vol. Noviembre 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE) 2011. Índice de Precios al Consumidor N° 157 - Boletín Informativo del Instituto Nacional de Estadísticas. In. Santiago de Chile, 2011, vol. N° 157/7 de diciembre de 2011.

ISO 15686-5: 2008. Buildings and constructed assets. Service life planning. Life cycle costing. In.: International Organization for Standardization,, 2008.

JANSON, U. 2008. Passive houses in Sweden: Experiences from design and construction phase. In Division of Energy and Building Design, Department of Architecture and Built Environment, Faculty of Engineering. Lund: Lund University, 2008, vol. Doktor, p. 198.

KAH, O., FEIST, W., PFLUGER, R., SCHNIEDERS, J., KAUFMANN, B., SCHULZ, T. AND BASTIAN, Z. 2008 Bewertung energetischer Anforderungen im Lichte steigender Energiepreise für die EnEV und die KfW-Förderung 2008.

- KALEMA, T., JÓHANNESSON, G., PYLSY, P. AND HAGENGRAN, P. 2008 Accuracy of Energy Analysis of Buildings: A Comparison of a Monthly Energy Balance Method and Simulation Methods in Calculating the Energy Consumption and the Effect of Thermal Mass. *Journal of Building Physics*, October 1, 2008 2008, vol. 32, no. 2, p. 101-130.
- KEHL, D. 2010. Sommerliches Komfortklima. In *Proceedings of the Holzbautag Biel 2010, Biel2010*.
- KOKOGIANNAKIS, G., STRACHAN, P.A. AND CLARKE, J.A. 2008 Comparison of the simplified methods of the ISO 13790 Standard and detailed modelling programs in a regulatory context. *Journal of Building Performance Simulation*, 2008, vol. 1 (4), p. 10.
- KORSGAARD ET AL 1978. DTH-Nul-Energihus. In *TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK*. Copenhagen, 1978.
- KRÄMER, S. 2009. Optimización del comportamiento térmico de la vivienda social ubicada en Chuchiñi, Salamanca, Chile. In *FOMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA (CNE/GTZ)*. Santiago de Chile, 2009.
- KRÄMER, S. AND NORDSIECK, G. 2009. Optimización del comportamiento térmico en vivienda social lo espejo II. In *FOMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA (CNE/GTZ)*. Santiago de Chile, 2009.
- KRAPMEIER, H. AND DRÖSSLER, E. 2001. CEPHEUS Wohnkomfort ohne Heizung. In *offizielles Schlussdokument des Projektes*. Wien, 2001.
- KRICK, B., FEIST, W. AND SCHNIEDERS, J. 2011. Funktionale Beschreibung von Passivhaeusern - eine klimaunabhaengige Definition. In *Proceedings of the 15 Internationale Passivhaustagung, Innsbruck2011*, W. FEIST Ed. Passivhaus Institut Darmstadt, 569-574.
- LIANG, Z. AND SHEN, H.-G. 2012 Determining sample size for building energy consumption surveys using statistical theory. *Energy and Buildings*, 2012, vol. 47, no. 0, p. 533-539.
- MARÍN, L.M., CUADRA, C.P., CUADRA, C.P., UBILLA, Y.R., OTÁROLA, C.Y. AND MORA, D.B. 2010. Reacondicionamiento Térmico de Viviendas en Uso. In *CORPORACIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LA CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN*. manual técnico: Reacondicionamiento Térmico de Viviendas en Uso. 2010.
- MÉNDEZ, P. AND BARDI, C. 2009. Asesoría en diseño y simulación conjunto habitacional las Malloa. In *FOMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA (CNE/GTZ)*. 2009, vol. Informe N°4: Informe final y resumen ejecutivo.
- METEOTEST 2010. Meteororm. [Version for 6.1.0.21. Meteotest, 2010. System requirements: METEONORM is a comprehensive meteorological reference, incorporating a catalogue of meteorological data and calculation procedures for solar applications and system design at any desired location in the world.
- MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO 2011. Artículo 4.1.10 Exigencias de acondicionamiento térmico de la Ordenanza general de urbanismo y construcciones. In *MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO*. Santiago de Chile, 2011.
- MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO AND GOBIERNO DE CHILE 2011. Artículo 4.1.10 sobre exigencias de acondicionamiento térmico de la Ordenanza general de urbanismo y construcciones. In *MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO*. Santiago de Chile, 2011.

MINVU 2006. Manual de Aplicación reglamentación térmica MINVU ordenanza general de urbanismo y construcciones Artículo 4.1.10. In MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO MINVU. Santiago de Chile, 2006.

MINVU 2008 Manual CCTE v2.0, Certificación del comportamiento térmico para edificios en Chile 2008.

MIOTTO, U., GARCÍA, R., ESCORCIA, O., TREBILCOCK, M. AND CELIS, F. 2011 Diseño Integrado para Viviendas Energéticamente Eficientes en Chile: Enhebrando Capacidades. Hábitat Sustentable, 2011, vol. Vol. 1, N°. 1,.

MONÁRDEZ, H. AND SARZOSA, M. 2007. Inercia térmica en viviendas. In FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL. Santiago de Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE, 2007, vol. Título, p. 142.

MORRISSEY, J. AND HORNE, R.E. 2011 Life cycle cost implications of energy efficiency measures in new residential buildings. Energy and Buildings, 2011, vol. 43, no. 4, p. 915-924.

NCH853 OF 2007. Acondicionamiento Térmico – Envoltorio Térmico de Edificios – Cálculo de resistencias y Transmitancias Térmicas. In INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. 2007.

NCH1079 OF 2008. Arquitectura y Construcción – Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico. In INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. 2008.

NCH1973 OF 2008. Características higrotérmicas de los elementos y componentes de edificación - Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial - Métodos de cálculo. In INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. 2008.

O'BRIEN, W., ATHIENITIS, A., BUCKING, S., DOIRON, M. AND KESIK, T. 2010 A Study of Design Tools and Processes Through a Near Net-Zero Energy House Redesign. IEA Solar Heating and Cooling Program, 2010, vol. Task 40/ECBCS Annex 52.

OLATE, R.D. 2008. Manual tasación de bienes raíces urbanos – rurales - agrícolas. In INSTITUTO INMOBILIARIO DE CHILE. Santiago de Chile, 2008.

ONDAC 2012. Ondac Chile S.A, Manual de Precios,. 2012, [cited 06.02. 2012]. Available from Internet:<<http://www.ondac.cl/somos.htm>>.

PASSIPEDIA 2010. Die Passivhaus Wissensdatenbank. 2010. Available from Internet:<http://passipedia.passiv.de/passipedia_de/>.

PASSIVHAUSINSTITUT 2009. Dämmen oder speichern? 2009, no. 21.08.2009 15:51. Available from Internet:<http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Daemmen_oder_Speich...>.

PASSIVHAUSINSTITUT 2009. Was ist ein Passivhaus? 2009, no. 21.08.2009 15:46. Available from Internet:<http://www.passiv.de/01_dph/St-dph/WasPH/WasPH.htm>.

- PEETERS, L., WETTER, M., FERGUSON, A. AND D'HAESELEER, W. 2010. The Coupling of ESP-R and Genopt: A Simple Case Study. In Proceedings of the Simulation Buildings 2010 Conference 2010, 9.
- PELZETER, A. 2005 Lebenszykluskosten als Benchmark. ILM Düsseldorf,, 2005.
- PEPER, S., KAH, O. AND FEIST, W. 2005. Zur Dauerhaftigkeit von Luftdichtheitskonzepten bei Passivhäusern, Feldmessungen. In. Darmstadt: Passivhaus Institut, 2005.
- REMUND, J. 2009. Vergleich von Testreferenzjahren mit stochastisch erzeugten Daten. In Proceedings of the 13. Internationale Passivhaustagung Frankfurt am Main 2009, PASSIVHAUS INSTITUT DARMSTADT Ed. Dr. Wolfgang Feist, pp483-484.
- ROCHARD, U. 2008 Comparability of energy parameters from calculation procedures used in Germany, France and Switzerland. Bauphysik, Oct 2008, vol. 30, no. 5, p. 328-332.
- ROLF GLOOR 2010. Heizungsvergleich. 2010, [cited 08.02. 2012]. Available from Internet: <<http://www.energie.ch/heizungsvergleich>>.
- RONGEN, L. AND SCHNIEDERS, J. 2011. Passivhaeuser fuer verschiedene Klimazonen. In Proceedings of the 15 Internationale Passivhaustagung, Innsbruck 2011, W. FEIST Ed. Passivhaus Institut Darmstadt, 335-343.
- RUIZ DE GAUNA, J.C. 2012. Plataforma Edificación Passivhaus. 2012, [cited 11.06 2012]. Available from Internet: <<http://www.plataforma-pep.org/>>.
- SAHEB, Y., BECIRSPAHIC, S. AND SIMON, J. 2006. Effect of the Certification on Chillers Energy Efficiency. In Proceedings of the IEECB,, Frankfurt, Germany 2006.
- SCHNIEDERS, J. 2009. Passive Houses in South West Europe, a quantitative investigation of some passive and active space conditioning techniques for highly energy efficient dwellings in the South West European region. In.: Passivehaus Institut Darmstadt, 2009.
- SCHNIEDERS, J. AND HERMELINK, A. 2006 CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building. Energy Policy, 2006, vol. 34, no. 2, p. 151-171.
- SCHULZE-DARUP, B. 2003. Energetische Wohngebäudesanierung mit Faktor 10 Analyse von Passivhaus-Konzepten und deren Anwendung auf die Sanierung. In Fachbereich Architektur. Hannover: Universität Hannover, 2003, vol. Doktor.
- SEEGER, B.S. 2007 ¿Cómo resolver el problema de la energía en Chile? Ciencia...Ahora, 2007, vol. Nº 20, año 10.
- SERNAC-CNE 2005. Comportamiento de consumo energetico, en familias urbanas tipo del gran Santiago. In GOBIERNO DE CHILE PPEE. 2005.
- SERVICIO DE IMPUESTOS INTERNOS 2003. Resolución exenta nº43 del 26 de diciembre del 2002. Materia : fija vida útil normal a los bienes físicos del activo inmovilizado para los efectos de su depreciación, conforme a las normas del nº 5 del artículo 31 de la ley de la renta, contenida en el artículo 1º del d.l. nº 824, de 1974. In SERVICIO DE IMPUESTOS INTERNOS. Santiago de Chile: Gobierno de Chile,, 2003.

- SERVICIO DE IMPUESTOS INTERNOS DE CHILE (SII) 2012. Definición del impuesto al valor agregado (IVA). 2012, [cited 03.02. 2012]. Available from Internet:<http://www.sii.cl/portales/inversionistas/imp_chile/impuestos_iva.htm>.
- SHURCLIFF, W.A. 1980. Super Insulated Houses and Double Envelope Houses. In Brick House,. Andover, 1980, vol. 1st edition,.
- STAUDT, A., ERHORN, H. AND VAN DIJK, D. 2010. Report on the Application of CEN-standard EN ISO 13790: Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling. In.: IEE-CENSE,, 2010.
- SUPERINTENDENCIA DE BANCOS E INSTITUCIONES FINANCIERAS 2011. Definición Unidad de Fomento (UF),. 2011, [cited 16.12. 2011]. Available from Internet:<<http://sbif.cl/sbifweb/servlet/Glosario?indice=5.0&letra=U>>.
- SUPERINTENDENCIA DE BANCOS E INSTITUCIONES FINANCIERAS 2011. Simulador de Crédito Hipotecario,. 2011, [cited 16.12. 2011]. Available from Internet:<<http://www.sbif.cl/sbifweb/servlet/InfoFinanciera?indice=4.4.1>>.
- TUHUS-DUBROW, D. AND KRARTI, M. 2010 Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. Building and Environment, 2010, vol. 45, no. 7, p. 1574-1581.
- VAN DER VEKEN, J., SAELENS, D., VERBEECK, G. AND HENS, H. 2004 Comparison of Steady-State and Dynamic Building Energy Simulation Programs. Buildings, 2004, vol. IX.
- VINCENZO, C., HOUCEM, E.M. AND ENRICO, F. 2007. Building energy performance assessment through simplified models: Application of the ISO 13790 quasi-steady state method. In Proceedings of the Building Simulation2007, 79-86.
- WASSOUF, M. 2008 La casa Passivhaus: El futuro estándar técnico de construcción europeo 2008, vol. n° 18 Verano 2008, p. 4.
- WETTER, M. 2009. GenOpt® Generic Optimization Program User Manual Version 3.0.0. In LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. Berkeley, 2009.
- WETTER, M. AND WRIGHT, J. 2003. Comparison of a generalized pattern search and a generic algorithm optimization method. In Building Simulation. Eindhoven Netherlands, , 2003, vol. Eighth, p. 1401 - 1408.
- WILSON, A. 2010. Passive House Arrives in North America: Could It Revolutionize the Way We Build? Environmental Building News [Type of Work]. 2010. Available from Internet:<<http://www.buildinggreen.com/auth/article.cfm/2010/3/31/Passive-House-Arrives-in-...>>.
- WRIGHT, J. AND ALAJMI, A. 2005. The robustness of genetic algorithms in solving unconstrained building optimization problems. In Building Simulation. Montréal Canada, , 2005, vol. Ninth, p. 1361 - 1368.
- ZHANG, Y. 2009. "Parallel" EnergyPlus and the development of a parametric analysis tool. In Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, July 27-30 2009, 7.

Bibliografía

ZHANG, Y. AND KOROLIJA, I. 2010. Performing complex parametric simulations with jEPlus. In Proceedings of the 9th International Conference on Sustainable Energy Technologies, Shanghai China,, 24-27 August 2010, 5.

ANEXOS

ANEXOS

A Anexo A: Información adicional acerca de la definición de los parámetros

A.1 Determinación de la composición de los elementos constructivos y de los espesores de la aislación térmica

Para el estudio paramétrico se eligieron dos sistemas constructivos distintos para representar una inercia térmica baja y alta. Para representar una inercia térmica baja se eligió el sistema constructivo madera sólida y para representar una inercia térmica alta se eligió hormigón armado. Se realizaron los cálculos según NCh. 853 of. 2007.

Tabla A-1: Muros exteriores con el espesor de la aislación térmica variable (elaboración propia).

Muro	Madera sólida	Hormigón armado
Exterior	4 mm Fibrocemento	20 mm estuco
	25 mm Camera de aire	X mm poliestireno expandido ($\lambda=0.04$ W/mK)
	Barrera de viento	
	X mm lana de vidrio ($\lambda=0.04$ W/mK)	
Interior	90 mm madera sólida	150 mm Hormigón armado

Tabla A-2: Techumbres con el espesor de la aislación térmica variable (elaboración propia).

Techumbre	Madera sólida	Hormigón armado
Exterior	Teja asfáltica	Teja asfáltica
	12 mm OSB	12 mm OSB
	25 mm Camera de aire	25 mm Camera de aire
	Barrera de agua y viento	Barrera de agua y viento
	X mm lana de vidrio ($\lambda=0.04$ W/mK)	X mm poliestireno expandido ($\lambda=0.04$ W/mK)
Interior	90 mm madera sólida	150 mm Hormigón armado

Tabla A-3: Composición del radier con el espesor de la aislación térmica variable (elaboración propia).

Radier	Hormigón armado
Exterior	X mm poliestireno expandido ($\lambda=0.04$ W/mK)
Interior	100 mm Hormigón armado

Tabla A-4: Resistencias térmicas de las diferentes capas de la construcción (elaboración propia).

	R_{si}	R_{se}	$R_{construcción}$ (sin aislación)	Suma R
	[m ² K/W]	[m ² K/W]	[m ² K/W]	[m ² K/W]
Muro madera sólida 90 mm	0,12	0,12	0,865	1,105
Muro hormigón armado 150 mm	0,12	0,05	0,092	0,262
Techo madera sólida 90 mm	0,10	0,10	0,865	1,065
Techo hormigón armado 150 mm	0,10	0,10	0,092	0,292

Tabla A-5: Espesor de la aislación térmica para cumplir un valor U definido en los muros (elaboración propia).

	U=0,5 [W/m ² K]	U=0,35 [W/m ² K]	U=0,2 [W/m ² K]
	[m]	[m]	[m]
Muro madera sólida 90 mm	0,036	0,070	0,156
Muro hormigón armado 150 mm	0,069	0,104	0,190

Tabla A-6: Espesor de la aislación térmica para cumplir un valor U definido en las techumbres (elaboración propia).

	U=0,4 [W/m ² K]	U=0,28 [W/m ² K]	U=0,16 [W/m ² K]
	[m]	[m]	[m]
Techo madera sólida 90 mm	0,057	0,100	0,207
Techo hormigón armado 150 mm	0,088	0,131	0,238

Tabla A-7: Propiedades térmicas de diferentes elementos en la construcción según (NCh. 853 of. 2007).

Nombre Material	Densidad ρ	Capacidad térmica C	Conductividad λ
	[kg/m ³]	[kJ/kgK]	[W/mK]
Hormigón armado (D = 2400)	2400	1,080	1,630
Poliestireno expandido	20	1,450	0,040
Estuco	2000	1,116	1,400
Estuco térmico	200	1,450	0,100
Ladrillo macizo (D = 1400)	1400	0,910	0,600
Fibrocemento	2000	1,050	0,580
Lana de vidrio	16	1,030	0,040
Madera Pino	410	2,500	0,104
Papel fieltro	1100	1,000	0,230
Yeso cartón	900	1,050	0,210

A.2 Determinación del tipo de vidrio de los casos de referencia según reglamentación térmica

La reglamentación térmica (MINVU, 2006) limita el porcentaje máximo de superficie de ventanas con respecto a paramentos verticales de la envolvente: El complejo de ventana deberá cumplir con las exigencias establecidas en la Ilustración A-1, en relación al tipo de vidrio que se especifique y a la zona térmica en la cual se emplace el proyecto de arquitectura.

Para determinar el porcentaje máximo de superficie de ventanas de un proyecto de arquitectura, se deberá realizar el siguiente procedimiento:

- a) Determinar la superficie de los paramentos verticales de la envolvente del proyecto de arquitectura. La superficie total a considerar para este cálculo, corresponderá a la suma de las superficies interiores de todos los muros perimetrales que considere la unidad habitacional, incluyendo los medianeros y muros divisorios.
- b) Determinar la superficie total de ventanas del proyecto de arquitectura correspondiente a la suma de la superficie de los vanos del muro en el cual está colocada la ventana, considerando, para ello, el marco como parte de su superficie.

La superficie máxima de ventanas que podrá contemplar el proyecto de arquitectura corresponderá a la superficie que resulte de la Ilustración A-1, respecto de la superficie de los paramentos verticales de la unidad habitacional señalada en el punto a) precedente, considerando la zona y el tipo de vidrio que se especifique.

VENTANAS			
ZONA	% Máximo de Superficie Vidriada Respecto a Paramentos Verticales de la Envolvente		
	Vidrio Monolítico (b)	DVH Doble Vidriado Hermético (c)	
		$3.6 \text{ W/m}^2\text{K} \geq U > 2.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ (a)	$U \leq 2.4 \text{ W/m}^2\text{K}$
1	50%	60%	80%
2	40%	60%	80%
3	25%	60%	80%
4	21%	60%	75%
5	18%	51%	70%
6	14%	37%	55%
7	12%	28%	37%

Ilustración A-1: % Máximo de superficie vidriada respecto a paramentos verticales de la envolvente (MINVU, 2006).

Tabla A-8: Superficie total de los elementos muros de las dos geometrías (elaboración propia).

Superficie muro	Norte	Este	Oeste	Sur	Total
	[m ²]				
Forma Cubo	35,36	35,36	35,36	35,36	141,44
Forma U	35,00	37,50	37,50	35,00	145,00

Tabla A-9: % Superficie vidriada de los casos de referencia y los valores U correspondientes de las ventanas (elaboración propia).

Superficie de ventanas					% Superficie vidriada		U _{max} ventana según zona térmica		
Sur	Este y Oeste	Norte	% vidrio/marco	Total	Forma Cubo	Forma U	Zona 3	Zona 4	Zona 6
[m ²]	[m ²]	[m ²]	[%]	[m ²]	[%]	[%]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
3,6	5+5	5	80	23,3	16,5	16,1	5,8	5,8	3,6
3,6	5+5	15	80	35,8	25,3	24,7	3,6	3,6	3,6
3,6	5+5	25	80	48,3	34,1	33,3	3,6	3,6	3,6
3,6	15+15	5	80	48,3	34,1	33,3	3,6	3,6	3,6
3,6	15+15	15	80	60,8	43,0	41,9	3,6	3,6	2,4
3,6	15+15	25	80	73,3	51,8	50,6	3,6	3,6	2,4

Tabla A-10: Tipos de vidrio utilizados en los casos de referencia (elaboración propia).

	Valor U	Valor g
	[W/m ² K]	[-]
Tipo 1 (vidrio simple 4mm)	5,8	0,89
Tipo 2 (vidrio doble hermético con 12 mm cámara de aire)	2,9	0,78
Tipo 3 (vidrio doble hermético con 12 mm cámara de aire y una capa de baja emisividad)	1,8	0,74

A.3 Transmitancia térmica de los elementos opacos de la envolvente e inercia térmica de la construcción de los casos de referencia

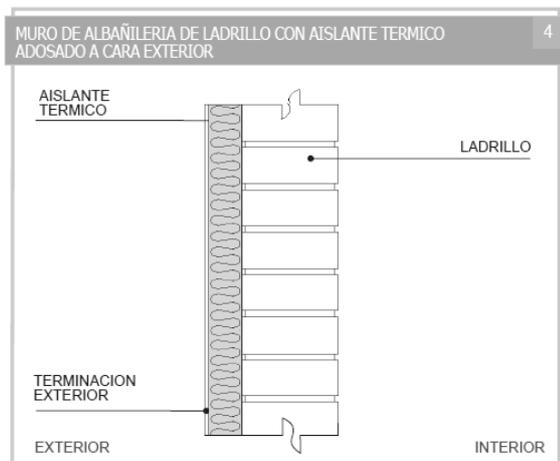


Ilustración A-2: Muro de ladrillo macizo con aislamiento térmico y estuco (MINVU, 2006).

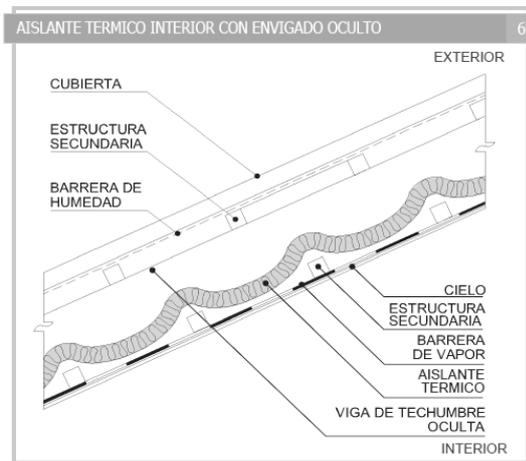


Ilustración A-3: Techumbre con vigas de madera con aislamiento térmico (MINVU, 2006).

Tabla A-11: Composición de los muros exteriores y de las techumbres con el espesor de la aislación térmica variable (elaboración propia).

	Muro ladrillo	Techumbre madera
Exterior	10 mm Estuco	Teja asfáltica
	X mm poliestireno expandido	12 mm OSB
		25 mm Camera de aire
		Barrera de agua y viento
		X mm lana de vidrio $\lambda=0.04$ W/(mK)
Interior	140 mm Ladrillo macizo (R = 1400)	10 mm Yeso cartón

Tabla A-12: Resistencias térmicas de las diferentes capas de la construcción del caso de referencia (elaboración propia).

	R_{si}	R_{se}	$R_{construcción}$ (sin aislación)	Suma R
	[m ² K/W]	[m ² K/W]	[m ² K/W]	[m ² K/W]
Muro: 10 mm Estuco + 140 mm Ladrillo macizo	0,12	0,05	0,240	0,410
Techo: 10mm Yeso cartón	0,10	0,10	0,048	0,248

Tabla A-13: Espesor de la aislación térmica para cumplir un valor U definido por zona térmica para los muros y techumbres de los casos de referencia (elaboración propia).

	Zona térmica 3	Zona térmica 4	Zona térmica 6
	[m]	[m]	[m]
Muro ladrillo con aislación	0,005	0,007	0,020
Techumbre madera con aislación	0,075	0,095	0,133

B Anexo B: Información adicional acerca de los resultados del análisis térmico por parámetro y nivel

B.1 Resumen de la demanda energética de todos los casos por parámetro y nivel en Santiago

Tabla B-1: Resumen estadístico de la demanda energética total de todos los casos de estudio en Santiago (elaboración propia).

Parámetros y niveles	Cantidad casos	Media	Varianza	Desv. estándar	Máximo	Mínimo
	[-]	[kWh/(m ² a)]				
Forma Cubo	3456	29,9	179,6	13,4	82,7	5,0
Forma U	3456	29,0	132,8	11,5	74,8	5,0
Orientación 0	2304	28,8	168,0	13,0	76,6	5,0
Orientación 45	2304	29,7	148,6	11,5	80,9	5,3
Orientación 315	2304	29,8	152,2	12,3	82,7	5,4
Ventana EO 15%	3456	23,7	84,6	9,2	61,1	5,0
Ventana EO 40%	3456	35,2	162,5	12,7	82,7	8,2
Ventana Norte 15%	2304	26,2	119,3	10,9	65,1	5,0
Ventana Norte 40%	2304	28,7	141,3	11,9	69,7	5,0
Ventana Norte 70%	2304	33,4	182,5	13,5	82,7	6,2
Alero norte Si	3456	28,2	131,1	11,5	70,1	5,3
Alero norte No	3456	30,7	178,6	13,4	82,7	5,0
Sombra Temp. Si	3456	25,2	93,4	9,7	65,2	5,0
Sombra Temp. No	3456	33,7	183,5	13,5	82,7	6,8
Ventana U=1,3 g=0,64	3456	25,0	99,8	10,0	61,8	5,0
Ventana U=2,7 g=0,78	3456	33,9	173,2	13,2	82,7	7,3
Inercia térmica Alta	3456	26,5	126,0	11,2	67,7	5,0
Inercia térmica Baja	3456	32,4	169,2	13,0	82,7	7,3
Aislación Muros U=0,2	2304	25,6	165,1	12,8	81,8	5,0
Aislación Muros U=0,35	2304	29,1	141,3	11,9	80,8	8,2
Aislación Muros U=0,5	2304	33,6	131,2	11,5	82,7	10,8
Recuperación calor Si	3456	24,9	131,6	11,5	72,0	5,0
Recuperación calor No	3456	34,0	139,7	11,8	82,7	8,6
Tubo Subterráneo Si	3456	27,0	135,2	11,6	74,5	5,0
Tubo Subterráneo No	3456	31,8	166,3	12,9	82,7	5,9

Tabla B-2: Resumen estadístico de la demanda energética en refrigeración de todos los casos de estudio en Santiago (elaboración propia).

Parámetros y niveles	Cantidad casos	Media	Varianza	Desv. estándar	Máximo	Mínimo
	[-]	[kWh/(m ² a)]				
Forma Cubo	3456	18,8	129,6	11,4	61,9	3,6
Forma U	3456	13,6	80,1	9,0	48,1	1,8
Orientación 0	2304	16,0	119,4	10,9	58,4	1,9
Orientación 45	2304	16,2	106,1	10,3	60,9	1,8
Orientación 315	2304	16,3	109,8	10,5	61,9	1,8
Ventana EO 15%	3456	10,2	38,6	6,2	39,7	1,8
Ventana EO 40%	3456	22,1	113,7	10,7	61,9	4,9
Ventana Norte 15%	2304	11,4	64,9	8,1	40,9	1,8
Ventana Norte 40%	2304	15,8	88,8	9,4	48,9	2,8
Ventana Norte 70%	2304	21,3	132,5	11,5	61,9	3,9
Alero norte Si	3456	13,4	71,4	8,5	43,3	1,8
Alero norte No	3456	19,0	136,7	11,7	61,9	2,1
Sombra Temp. Si	3456	11,9	47,1	6,9	42,0	1,8
Sombra Temp. No	3456	20,4	140,4	11,8	61,9	2,9
Ventana U=1,3 g=0,64	3456	14,3	82,7	9,1	49,2	1,8
Ventana U=2,7 g=0,78	3456	18,1	133,7	11,6	61,9	2,2
Inercia térmica Alta	3456	14,2	90,9	9,5	52,0	1,8
Inercia térmica Baja	3456	18,1	124,9	11,2	61,9	2,7
Aislación Muros U=0,2	2304	16,1	128,4	11,3	61,9	1,8
Aislación Muros U=0,35	2304	16,0	108,3	10,4	58,2	2,5
Aislación Muros U=0,5	2304	16,5	98,5	9,9	57,0	3,4
Recuperación calor Si	3456	16,2	113,3	10,6	61,9	1,8
Recuperación calor No	3456	16,1	110,3	10,5	60,8	1,8
Tubo Subterráneo Si	3456	16,2	111,2	10,5	61,7	1,8
Tubo Subterráneo No	3456	16,2	112,4	10,6	61,9	1,8

Tabla B-3: Resumen estadístico de la demanda energética en calefacción de todos los casos de estudio en Santiago (elaboración propia).

Parámetros y niveles	Cantidad casos	Media	Varianza	Desv. estándar	Máximo	Mínimo
	[-]	[kWh/(m ² a)]				
Forma Cubo	3456	11,1	46,4	6,8	31,0	0,0
Forma U	3456	15,4	62,2	7,9	36,9	0,2
Orientación 0	2304	12,8	59,2	7,7	36,7	0,0
Orientación 45	2304	13,4	58,7	7,7	36,9	0,1
Orientación 315	2304	13,5	59,0	7,7	36,9	0,1
Ventana EO 15%	3456	13,5	63,5	8,0	36,9	0,0
Ventana EO 40%	3456	13,0	54,5	7,4	35,0	0,2
Ventana Norte 15%	2304	14,8	61,9	7,9	36,9	0,9
Ventana Norte 40%	2304	12,9	56,3	7,5	35,6	0,0
Ventana Norte 70%	2304	12,0	55,1	7,4	35,4	0,0
Alero norte Si	3456	14,8	61,8	7,9	36,9	0,4
Alero norte No	3456	11,7	51,6	7,2	34,8	0,0
Sombra Temp. Si	3456	13,2	59,1	7,7	36,9	0,0
Sombra Temp. No	3456	13,2	59,0	7,7	36,9	0,0
Ventana U=1,3 g=0,64	3456	10,7	49,7	7,1	34,3	0,0
Ventana U=2,7 g=0,78	3456	15,8	55,1	7,4	36,9	0,9
Inercia térmica Alta	3456	12,2	60,0	7,7	36,9	0,0
Inercia térmica Baja	3456	14,2	56,1	7,5	36,4	0,8
Aislación Muros U=0,2	2304	9,5	42,3	6,5	27,4	0,0
Aislación Muros U=0,35	2304	13,1	49,4	7,0	31,7	0,5
Aislación Muros U=0,5	2304	17,1	57,3	7,6	36,9	1,8
Recuperación calor Si	3456	8,6	23,2	4,8	21,8	0,0
Recuperación calor No	3456	17,9	52,2	7,2	36,9	0,9
Tubo Subterráneo Si	3456	10,9	35,9	6,0	27,9	0,0
Tubo Subterráneo No	3456	15,6	71,1	8,4	36,9	0,1

B.2 Resumen de la demanda energética de todos los casos por parámetro y nivel en Concepción

Tabla B-4: Resumen estadístico de la demanda energética total de todos los casos de estudio en Concepción (elaboración propia).

Parámetros y niveles	Cantidad casos	Media	Varianza	Desv. estándar	Máximo	Mínimo
	[-]	[kWh/(m ² a)]				
Forma Cubo	3456	21,5	107,6	10,4	52,8	1,0
Forma U	3456	27,5	128,6	11,3	55,2	3,5
Orientación 0	2304	24,2	131,1	11,4	55,2	1,0
Orientación 45	2304	24,7	124,4	11,2	55,0	3,0
Orientación 315	2304	24,7	125,8	11,2	55,0	2,2
Ventana EO 15%	3456	24,0	133,3	11,5	55,2	1,0
Ventana EO 40%	3456	25,1	120,4	11,0	54,5	3,5
Ventana Norte 15%	2304	25,8	130,8	11,4	55,2	4,0
Ventana Norte 40%	2304	24,0	123,0	11,1	54,0	2,1
Ventana Norte 70%	2304	23,7	125,0	11,2	54,5	1,0
Alero norte Si	3456	26,3	133,7	11,6	55,2	3,4
Alero norte No	3456	22,8	114,4	10,7	52,8	1,0
Sombra Temp. Si	3456	24,2	130,4	11,4	55,2	1,0
Sombra Temp. No	3456	24,8	123,7	11,1	54,1	1,0
Ventana U=1,3 g=0,64	3456	20,4	103,5	10,2	51,1	1,0
Ventana U=2,7 g=0,78	3456	28,7	116,2	10,8	55,2	4,7
Inercia térmica Alta	3456	23,4	129,9	11,4	55,2	1,0
Inercia térmica Baja	3456	25,7	121,7	11,0	54,5	3,1
Aislación Muros U=0,2	2304	19,4	102,0	10,1	47,2	1,0
Aislación Muros U=0,35	2304	24,4	107,9	10,4	49,3	3,5
Aislación Muros U=0,5	2304	29,8	118,0	10,9	55,2	6,4
Recuperación calor Si	3456	16,6	50,4	7,1	37,7	1,0
Recuperación calor No	3456	32,4	78,9	8,9	55,2	7,7
Tubo Subterráneo Si	3456	22,8	104,3	10,2	49,1	1,0
Tubo Subterráneo No	3456	26,2	144,3	12,0	55,2	1,5

Tabla B-5: Resumen estadístico de la demanda energética en refrigeración de todos los casos de estudio en Concepción (elaboración propia).

Parámetros y niveles	Cantidad casos	Media	Varianza	Desv. estándar	Máximo	Mínimo
	[-]	[kWh/(m ² a)]				
Forma Cubo	3456	1,5	5,8	2,4	17,8	0,0
Forma U	3456	0,6	1,3	1,1	9,5	0,0
Orientación 0	2304	1,1	3,7	1,9	14,6	0,0
Orientación 45	2304	0,9	3,2	1,8	16,0	0,0
Orientación 315	2304	1,1	4,5	2,1	17,8	0,0
Ventana EO 15%	3456	0,3	0,6	0,7	8,2	0,0
Ventana EO 40%	3456	1,8	5,8	2,4	17,8	0,0
Ventana Norte 15%	2304	0,5	1,1	1,1	7,6	0,0
Ventana Norte 40%	2304	0,9	2,6	1,6	10,5	0,0
Ventana Norte 70%	2304	1,7	6,9	2,6	17,8	0,0
Alero norte Si	3456	0,6	1,4	1,2	7,7	0,0
Alero norte No	3456	1,5	5,8	2,4	17,8	0,0
Sombra Temp. Si	3456	0,8	2,2	1,5	12,4	0,0
Sombra Temp. No	3456	1,3	5,2	2,3	17,8	0,0
Ventana U=1,3 g=0,64	3456	0,5	0,9	1,0	8,0	0,0
Ventana U=2,7 g=0,78	3456	1,6	6,0	2,5	17,8	0,0
Inercia térmica Alta	2304	1,1	4,5	2,1	17,8	0,0
Inercia térmica Baja	2304	1,0	3,6	1,9	16,2	0,0
Aislación Muros U=0,2	2304	1,0	3,2	1,8	15,4	0,0
Aislación Muros U=0,35	3456	1,1	4,0	2,0	17,8	0,0
Aislación Muros U=0,5	3456	1,0	3,5	1,9	16,4	0,0
Recuperación calor Si	3456	1,1	4,0	2,0	17,8	0,0
Recuperación calor No	3456	1,0	3,5	1,9	16,4	0,0
Tubo Subterráneo Si	3456	1,0	3,7	1,9	17,6	0,0
Tubo Subterráneo No	3456	1,0	3,8	2,0	17,8	0,0

Tabla B-6: Resumen estadístico de la demanda energética en calefacción de todos los casos de estudio en Concepción (elaboración propia).

Parámetros y niveles	Cantidad casos	Media	Varianza	Desv. estándar	Máximo	Mínimo
	[-]	[kWh/(m ² a)]				
Forma Cubo	3456	20,0	100,7	10,0	46,9	1,0
Forma U	3456	27,0	128,1	11,3	55,2	3,5
Orientación 0	2304	23,0	130,0	11,4	55,2	1,0
Orientación 45	2304	23,8	123,9	11,1	55,0	2,8
Orientación 315	2304	23,6	125,4	11,2	55,0	1,8
Ventana EO 15%	3456	23,7	134,8	11,6	55,2	1,0
Ventana EO 40%	3456	23,2	118,1	10,9	53,5	2,1
Ventana Norte 15%	2304	25,3	131,1	11,5	55,2	4,0
Ventana Norte 40%	2304	23,1	121,8	11,0	54,0	2,1
Ventana Norte 70%	2304	23,6	125,4	11,2	55,0	1,8
Alero norte Si	3456	25,7	133,0	11,5	55,2	3,4
Alero norte No	3456	21,3	110,5	10,5	52,1	1,0
Sombra Temp. Si	3456	23,7	131,5	11,5	55,2	1,0
Sombra Temp. No	3456	23,2	121,4	11,0	53,8	1,0
Ventana U=1,3 g=0,64	3456	19,6	107,4	10,4	51,1	1,0
Ventana U=2,7 g=0,78	3456	27,4	115,4	10,7	55,2	4,6
Inercia térmica Alta	3456	22,9	131,9	11,5	55,2	1,0
Inercia térmica Baja	3456	24,1	120,4	11,0	53,5	2,6
Aislación Muros U=0,2	2304	18,3	98,6	9,9	43,7	1,0
Aislación Muros U=0,35	2304	23,4	107,3	10,4	48,5	3,4
Aislación Muros U=0,5	2304	28,8	119,2	10,9	55,2	6,3
Recuperación calor Si	3456	15,6	47,2	6,9	33,4	1,0
Recuperación calor No	3456	31,4	80,0	8,9	55,2	7,7
Tubo Subterráneo Si	3456	21,8	103,5	10,2	49,1	1,0
Tubo Subterráneo No	3456	25,2	143,9	12,0	55,2	1,4

B.3 Resumen de la demanda energética de todos los casos por parámetro y nivel en Puerto Montt

Tabla B-7: Resumen estadístico de la demanda energética total de todos los casos de estudio en Puerto Montt (elaboración propia).

Parámetros y niveles	Cantidad casos	Media	Varianza	Desv. estándar	Máximo	Mínimo
	[-]	[kWh/(m ² a)]				
Forma Cubo	3456	43,1	320,4	17,9	85,6	5,8
Forma U	3456	53,6	374,4	19,3	98,5	11,2
Orientación 0	2304	47,9	384,5	19,6	98,5	5,8
Orientación 45	2304	48,7	368,2	19,2	96,9	9,7
Orientación 315	2304	48,5	372,1	19,3	97,2	8,3
Ventana EO 15%	3456	47,5	378,5	19,5	94,8	5,8
Ventana EO 40%	3456	49,3	369,8	19,2	98,5	9,3
Ventana Norte 15%	2304	50,2	372,6	19,3	96,2	13,4
Ventana Norte 40%	2304	47,9	368,2	19,2	97,1	8,4
Ventana Norte 70%	2304	47,1	379,1	19,5	98,5	5,8
Alero norte Si	3456	51,5	389,8	19,7	98,5	11,7
Alero norte No	3456	45,3	340,7	18,5	92,6	5,8
Sombra Temp. Si	3456	49,3	396,5	19,9	98,5	5,8
Sombra Temp. No	3456	47,4	351,6	18,8	91,8	5,8
Ventana U=1,3 g=0,64	3456	40,5	303,2	17,4	86,5	5,8
Ventana U=2,7 g=0,78	3456	56,3	322,5	18,0	98,5	16,4
Inercia térmica Alta	3456	48,2	399,2	20,0	98,5	5,8
Inercia térmica Baja	3456	48,5	350,8	18,7	96,2	9,4
Aislación Muros U=0,2	2304	39,1	305,7	17,5	81,7	5,8
Aislación Muros U=0,35	2304	48,1	310,6	17,6	89,2	12,2
Aislación Muros U=0,5	2304	57,9	331,0	18,2	98,5	19,5
Recuperación calor Si	3456	34,5	160,7	12,7	67,0	5,8
Recuperación calor No	3456	62,3	201,1	14,2	98,5	25,7
Tubo Subterráneo Si	3456	47,9	367,8	19,2	97,4	5,8
Tubo Subterráneo No	3456	48,8	381,8	19,5	98,5	6,0

Tabla B-8: Resumen estadístico de la demanda energética en refrigeración de todos los casos de estudio en Puerto Montt (elaboración propia).

Parámetros y niveles	Cantidad casos	Media	Varianza	Desv. estándar	Máximo	Mínimo
	[-]	[kWh/(m ² a)]				
Forma Cubo	3456	0,3	0,6	0,8	7,2	0,0
Forma U	3456	0,1	0,1	0,3	3,4	0,0
Orientación 0	2304	0,2	0,3	0,6	5,5	0,0
Orientación 45	2304	0,2	0,3	0,5	6,1	0,0
Orientación 315	2304	0,2	0,5	0,7	7,2	0,0
Ventana EO 15%	3456	0,0	0,0	0,2	2,8	0,0
Ventana EO 40%	3456	0,4	0,6	0,8	7,2	0,0
Ventana Norte 15%	2304	0,1	0,1	0,2	2,2	0,0
Ventana Norte 40%	2304	0,2	0,2	0,4	3,5	0,0
Ventana Norte 70%	2304	0,4	0,8	0,9	7,2	0,0
Alero norte Si	3456	0,1	0,1	0,3	2,0	0,0
Alero norte No	3456	0,3	0,6	0,8	7,2	0,0
Sombra Temp. Si	3456	0,1	0,0	0,2	2,6	0,0
Sombra Temp. No	3456	0,4	0,6	0,8	7,2	0,0
Ventana U=1,3 g=0,64	3456	0,2	0,2	0,5	5,2	0,0
Ventana U=2,7 g=0,78	3456	0,3	0,5	0,7	7,2	0,0
Inercia térmica Alta	3456	0,1	0,0	0,2	2,1	0,0
Inercia térmica Baja	3456	0,4	0,6	0,8	7,2	0,0
Aislación Muros U=0,2	2304	0,3	0,5	0,7	7,2	0,0
Aislación Muros U=0,35	2304	0,2	0,3	0,6	6,2	0,0
Aislación Muros U=0,5	2304	0,2	0,2	0,5	5,6	0,0
Recuperación calor Si	3456	0,2	0,4	0,6	7,2	0,0
Recuperación calor No	3456	0,2	0,3	0,6	6,7	0,0
Tubo Subterráneo Si	3456	0,2	0,4	0,6	7,1	0,0
Tubo Subterráneo No	3456	0,2	0,4	0,6	7,2	0,0

Tabla B-9: Resumen estadístico de la demanda energética en calefacción de todos los casos de estudio en Puerto Montt (elaboración propia).

Parámetros y niveles	Cantidad casos	Media	Varianza	Desv. estándar	Máximo	Mínimo
	[-]	[kWh/(m ² a)]				
Forma Cubo	3456	42,8	319,7	17,9	85,4	5,8
Forma U	3456	53,5	374,7	19,4	98,5	11,2
Orientación 0	2304	47,7	385,6	19,6	98,5	5,8
Orientación 45	2304	48,5	368,9	19,2	96,9	9,7
Orientación 315	2304	48,3	373,3	19,3	97,2	8,3
Ventana EO 15%	3456	47,4	379,0	19,5	94,8	5,8
Ventana EO 40%	3456	48,9	371,9	19,3	98,5	9,1
Ventana Norte 15%	2304	50,1	373,0	19,3	96,2	13,4
Ventana Norte 40%	2304	47,7	368,8	19,2	97,1	8,4
Ventana Norte 70%	2304	46,7	380,3	19,5	98,5	5,8
Alero norte Si	3456	51,4	390,1	19,8	98,5	11,7
Alero norte No	3456	44,9	341,0	18,5	92,6	5,8
Sombra Temp. Si	3456	49,3	397,2	19,9	98,5	5,8
Sombra Temp. No	3456	47,1	352,5	18,8	91,8	5,8
Ventana U=1,3 g=0,64	3456	40,4	305,6	17,5	86,5	5,8
Ventana U=2,7 g=0,78	3456	56,0	324,0	18,0	98,5	16,4
Inercia térmica Alta	3456	48,2	399,7	20,0	98,5	5,8
Inercia térmica Baja	3456	48,2	352,3	18,8	96,1	9,3
Aislación Muros U=0,2	2304	38,8	305,3	17,5	81,7	5,8
Aislación Muros U=0,35	2304	47,9	311,2	17,6	89,2	12,2
Aislación Muros U=0,5	2304	57,8	332,2	18,2	98,5	19,5
Recuperación calor Si	3456	34,2	160,8	12,7	66,9	5,8
Recuperación calor No	3456	62,1	202,7	14,2	98,5	25,7
Tubo Subterráneo Si	3456	47,7	368,9	19,2	97,4	5,8
Tubo Subterráneo No	3456	48,6	382,7	19,6	98,5	6,0

B.4 Resumen de la demanda energética total para los casos que cumplieron el estándar Passivhaus por parámetro y nivel

Tabla B-10: Resumen estadístico de la demanda energética total para los casos que cumplieron el estándar Passivhaus en Santiago (elaboración propia).

Parámetros y niveles	Cantidad casos	Media	Varianza	Desv. estándar	Máximo	Mínimo
	[-]	[kWh/(m ² a)]				
Forma Cubo	759	16,6	34,8	5,9	32,0	5,0
Forma U	1103	18,9	18,9	6,0	33,9	5,0
Orientación 0	667	17,3	38,0	6,2	33,8	5,0
Orientación 45	630	18,4	35,5	6,0	33,9	5,3
Orientación 315	565	18,3	37,0	6,1	33,9	5,4
Ventana EO 15%	1705	18,0	38,0	6,2	33,9	5,0
Ventana EO 40%	157	17,4	26,6	5,2	29,4	8,2
Ventana Norte 15%	1005	18,5	40,7	6,4	33,9	5,0
Ventana Norte 40%	568	17,4	33,1	5,8	32,9	5,0
Ventana Norte 70%	289	17,3	30,4	5,5	30,3	6,2
Alero norte Si	1110	18,3	36,3	6,0	33,9	5,3
Alero norte No	752	17,4	37,8	6,2	32,9	5,0
Sombra Temp. Si	1142	17,3	34,4	5,9	32,0	5,0
Sombra Temp. No	720	19,0	39,6	6,3	33,9	6,8
Ventana U=1,3 g=0,64	1170	16,9	37,1	6,1	31,9	5,0
Ventana U=2,7 g=0,78	692	19,8	32,0	5,7	33,9	7,3
Inercia térmica Alta	1260	17,8	39,7	6,3	33,9	5,0
Inercia térmica Baja	602	18,4	31,4	5,6	31,9	7,3
Aislación Muros U=0,2	830	15,5	36,0	6,0	31,0	5,0
Aislación Muros U=0,35	629	18,7	28,5	5,3	32,0	8,2
Aislación Muros U=0,5	403	22,0	22,6	22,6	33,9	10,8
Recuperación calor Si	1082	15,0	23,5	4,8	27,9	5,0
Recuperación calor No	780	22,2	25,9	5,1	33,9	8,6
Tubo Subterráneo Si	1064	17,4	35,3	5,9	33,9	5,0
Tubo Subterráneo No	798	18,7	38,7	6,2	32,0	5,9

Tabla B-11: Resumen estadístico de la demanda energética total para los casos que cumplieron el estándar Passivhaus en Concepción (elaboración propia).

Parámetros y niveles	Cantidad casos	Media	Varianza	Desv. estándar	Máximo	Mínimo
	[-]	[kWh/(m ² a)]				
Forma Cubo	1984	16,7	61,2	7,8	37,7	1,0
Forma U	1939	20,8	64,4	8,0	45,0	3,5
Orientación 0	1300	18,4	71,2	8,4	45,0	1,0
Orientación 45	1333	18,9	64,5	8,0	44,8	3,0
Orientación 315	1290	18,9	65,5	8,1	44,9	2,2
Ventana EO 15%	2496	19,5	77,2	8,8	45,0	1,0
Ventana EO 40%	1427	17,4	46,7	6,8	36,4	3,5
Ventana Norte 15%	1536	20,9	75,2	8,7	45,0	4,0
Ventana Norte 40%	1330	18,2	61,5	7,8	41,6	2,1
Ventana Norte 70%	1057	16,3	49,1	7,0	38,4	1,0
Alero norte Si	2027	20,0	67,2	8,2	45,0	3,4
Alero norte No	1896	17,4	63,7	8,0	42,6	1,0
Sombra Temp. Si	2188	18,4	66,7	8,2	45,0	1,0
Sombra Temp. No	1735	19,1	67,3	8,2	44,1	1,0
Ventana U=1,3 g=0,64	2461	17,5	71,3	8,4	45,0	1,0
Ventana U=2,7 g=0,78	1462	20,8	53,4	7,3	42,2	4,7
Inercia térmica Alta	2401	19,0	76,3	8,7	45,0	1,0
Inercia térmica Baja	1522	18,3	52,4	7,2	36,5	3,1
Aislación Muros U=0,2	1651	16,6	74,5	8,6	42,2	1,0
Aislación Muros U=0,35	1335	19,3	59,9	7,7	42,2	3,5
Aislación Muros U=0,5	937	21,6	48,0	6,9	45,0	6,4
Recuperación calor Si	2574	14,9	38,4	6,2	32,2	1,0
Recuperación calor No	1349	26,0	41,5	6,4	45,0	7,7
Tubo Subterráneo Si	2251	19,2	70,7	8,4	45,0	1,0
Tubo Subterráneo No	1672	18,1	61,6	7,8	42,2	1,5

Tabla B-12: Resumen estadístico de la demanda energética total para los casos que cumplieron el estándar Passivhaus en Puerto Montt (elaboración propia).

Parámetros y niveles	Cantidad casos	Media	Varianza	Desv. estándar	Máximo	Mínimo
	[-]	[kWh/(m ² a)]				
Forma Cubo	1061	25,0	93,8	9,7	57,2	5,8
Forma U	686	29,5	90,8	9,5	60,5	11,2
Orientación 0	589	26,4	106,1	10,3	60,5	5,8
Orientación 45	577	27,0	92,0	9,6	59,9	9,7
Orientación 315	581	26,9	94,1	9,7	59,9	8,3
Ventana EO 15%	1173	28,4	113,1	10,6	60,5	5,8
Ventana EO 40%	574	23,4	48,7	7,0	43,2	9,3
Ventana Norte 15%	742	30,4	110,2	10,5	60,5	13,4
Ventana Norte 40%	582	25,5	74,6	8,6	57,0	8,4
Ventana Norte 70%	423	22,0	57,9	7,6	54,0	5,8
Alero norte Si	865	28,6	95,3	9,8	60,5	11,7
Alero norte No	882	25,0	93,1	9,7	56,9	5,8
Sombra Temp. Si	895	26,9	103,3	10,2	60,5	5,8
Sombra Temp. No	852	26,6	91,3	9,6	91,3	5,8
Ventana U=1,3 g=0,64	1345	25,4	100,1	10,0	60,5	5,8
Ventana U=2,7 g=0,78	402	31,3	61,6	7,9	56,8	16,4
Inercia térmica Alta	1110	27,8	109,6	10,5	60,5	5,8
Inercia térmica Baja	637	25,0	71,5	8,5	57,0	9,4
Aislación Muros U=0,2	987	25,2	124,2	11,1	60,5	5,8
Aislación Muros U=0,35	574	28,2	62,3	7,9	57,2	12,2
Aislación Muros U=0,5	186	30,8	28,0	5,3	44,9	19,5
Recuperación calor Si	571	24,8	63,2	7,9	48,9	5,8
Recuperación calor No	176	44,1	69,4	8,3	60,5	25,7
Tubo Subterráneo Si	969	28,0	116,8	10,8	60,5	5,8
Tubo Subterráneo No	778	25,1	68,6	8,3	48,9	6,0

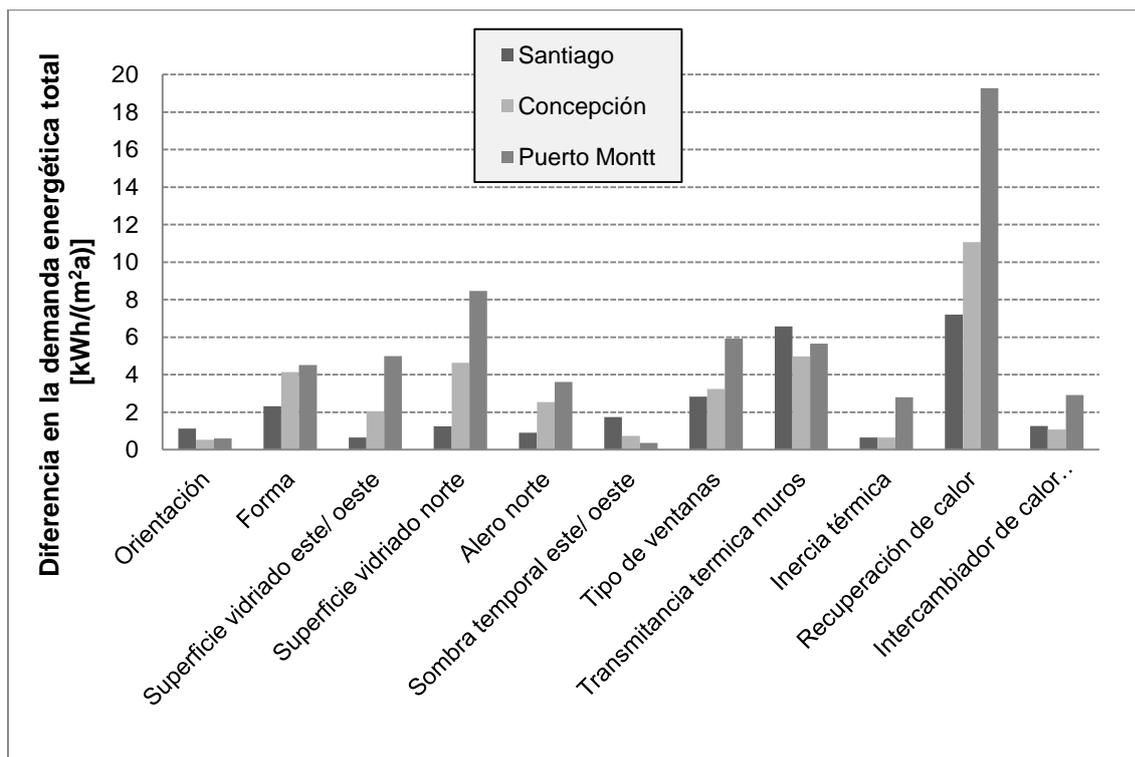


Ilustración B-1: Diferencia en la demanda energética total para los casos que cumplieron el estándar Passivhaus por parámetros en todas las ciudades juntas (elaboración propia).

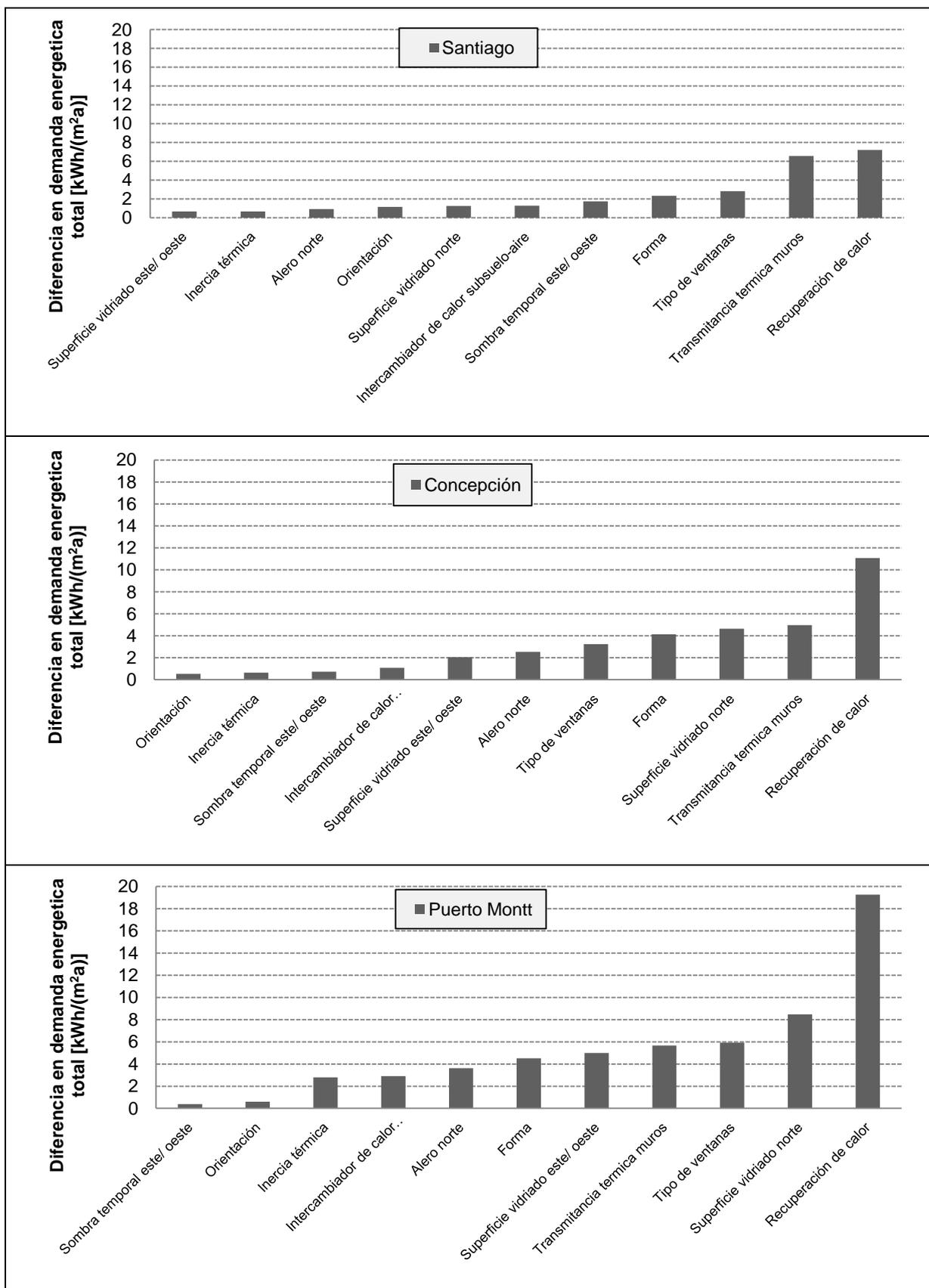


Ilustración B-2: Diferencia en la demanda energética total para los casos que cumplieron el estándar Passivhaus por parámetros separados por ciudades Santiago, Concepción y Puerto Montt (elaboración propia).

C ANEXO C: Información adicional del análisis de rentabilidad del estándar Passivhaus en Chile

C.1 Precios unitarios

Tabla C-1: Precios unitarios muros (elaboración propia).

	Componente	Por m ² con IVA
1	Muro hormigón U=0,5 [W/m ² K]	\$ 63.078
2	Muro hormigón U=0,35 [W/m ² K]	\$ 63.922
3	Muro hormigón U=0,2 [W/m ² K]	\$ 65.958
4	Muro madera sólida U=0,5 [W/m ² K]	\$ 95.146
5	Muro madera sólida U=0,35 [W/m ² K]	\$ 96.252
6	Muro madera sólida U=0,2 [W/m ² K]	\$ 98.659
7	Muro Zona térmica 3 U=1,9 [W/m ² K]	\$ 26.201
8	Muro Zona térmica 4 U=1,7 [W/m ² K]	\$ 26.201
9	Muro Zona térmica 6 U=1,1 [W/m ² K]	\$ 27.082
10	Muro hormigón sin aislación	\$ 59.073
11	Muro madera sólida sin aislación	\$ 85.805

Tabla C-2: Precios unitarios de techumbres (elaboración propia).

	Componente	Por m ² con IVA
1	Techumbre hormigón U=0,4 [W/m ² K]	\$ 79.202
2	Techumbre hormigón U=0,28 [W/m ² K]	\$ 80.939
3	Techumbre hormigón U=0,16 [W/m ² K]	\$ 82.772
4	Techumbre madera sólida U=0,4 [W/m ² K]	\$ 117.267
5	Techumbre madera sólida U=0,28 [W/m ² K]	\$ 118.370
6	Techumbre madera sólida U=0,16 [W/m ² K]	\$ 121.531
7	Techumbre Zona térmica 3 U=0,47 [W/m ² K]	\$ 36.999
8	Techumbre Zona térmica 4 U=0,38 [W/m ² K]	\$ 37.549
9	Techumbre Zona térmica 6 U=0,28 [W/m ² K]	\$ 38.839

Tabla C-3: Precios unitarios de radier (elaboración propia).

	Componente	Por m ² con IVA
1	Radier hormigón U=0,34 [W/m ² K]	\$ 29.145
2	Radier hormigón U=0,64 [W/m ² K]	\$ 27.955
3	Radier hormigón U=4,33 [W/m ² K]	\$ 24.677

Tabla C-4: Precios unitarios de entrepiso (elaboración propia).

	Componente	Por m ² con IVA
1	Entrepiso madera sólida - hormigón	\$ 29.145
2	Entrepiso hormigón	\$ 27.955

Tabla C-5: Precios unitarios de ventanas (elaboración propia).

	Componente	Por m ² con IVA
1	Ventana U=5,8 [W/m ² K] g=0,89 [-]	\$ 83.300
2	Ventana U=2,9 [W/m ² K] g=0,78 [-]	\$ 130.900
3	Ventana U=1,8 [W/m ² K] g=0,74 [-]	\$ 166.600
4	Ventana U=1,3 [W/m ² K] g=0,64 [-]	\$ 220.150

Tabla C-6: Precios unitarios de alero (elaboración propia).

	Componente	Por unidad con IVA
1	Alero o elemento de sombra fija l=2,5 m	\$ 78.344
2	Alero o elemento de sombra fija l=7,5 m	\$ 235.031
3	Alero o elemento de sombra fija l=12,5 m	\$ 396.941

Tabla C-7: Precios unitarios elementos de sombra temporal (elaboración propia).

	Componente	Por m ² con IVA
1	Elemento de sombra temporal interior	\$ 8.806
2	Elemento de sombra temporal exterior	\$ 49.980

Tabla C-8: Precios unitarios sistemas de climatización y varios (elaboración propia).

	Componente	Por unidad con IVA
1	Intercambiador de calor subsuelo aire	\$ 910.481
2	Sistema de ventilación con recuperación de calor	\$ 3.927.000
3	Sistema de ventilación sin recuperación de calor	\$ 1.487.500
4	Calefacción central	\$ 2.036.745
5	Opcional: Sistema de refrigeración	\$ 797.300
6	Costos adicionales	\$ 500.038

C.2 Diferencia en los costos de inversión dIC e influencia de los parámetros y sus niveles

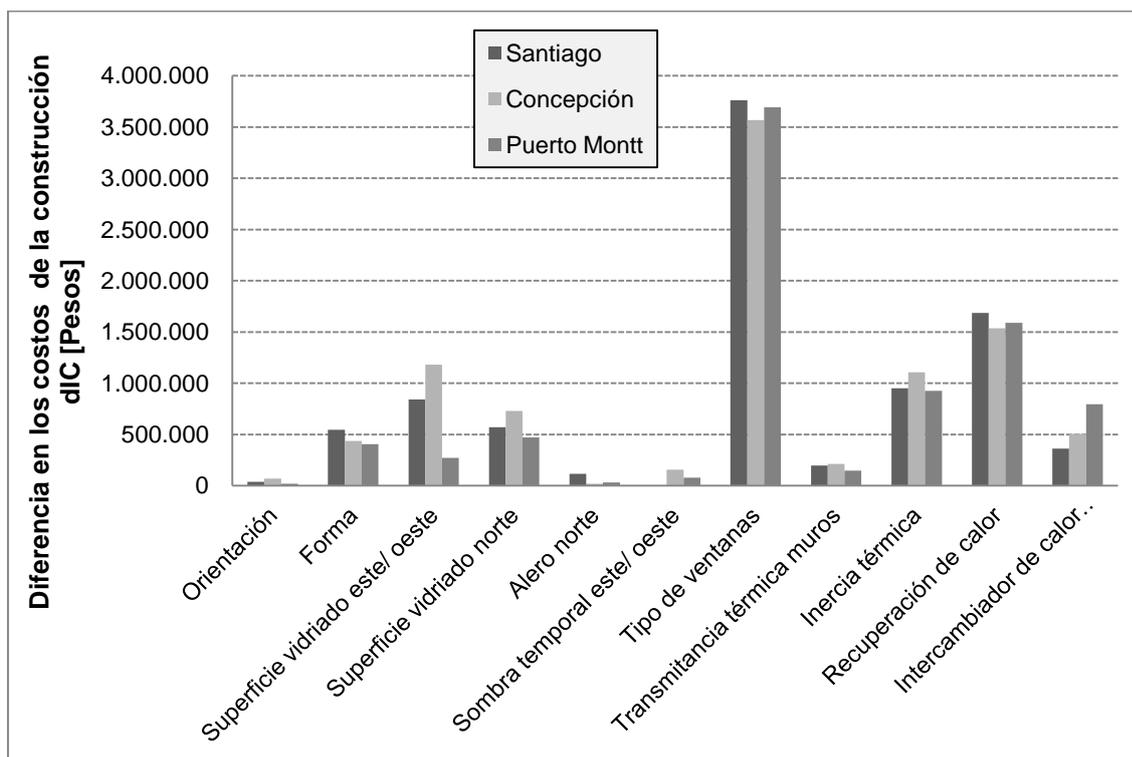


Ilustración C-1: Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia en los costos de inversión dIC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no (elaboración propia).

Tabla C-9: Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia en los costos de inversión dIC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no (elaboración propia).

Parámetro	Nivel	Diferencia en los costos de inversión dIC (promedio)		
		[Pesos]	[Pesos]	[Pesos]
Ciudad/ Ubicación		Santiago	Concepción	Puerto Montt
Orientación	Noroeste (315°)	-5.790.182	-5.974.745	-5.621.204
	Norte (0°)	-5.751.286	-6.035.317	-5.601.253
	Nordeste (45°)	-5.790.182	-6.042.339	-5.608.205
Forma	Compacto	-5.504.219	-5.799.410	-5.408.331
	Irregular	-6.050.214	-6.235.524	-5.812.111
Superficie vidriada este/ oeste	15% del muro	-5.355.943	-5.426.808	-5.745.658
	40% del muro	-6.198.491	-6.608.125	-5.474.783
Superficie vidriada norte	15% del muro	-5.586.168	-5.747.131	-5.783.147
	40% del muro	-5.589.423	-5.828.354	-5.312.710
	70% del muro	-6.156.059	-6.476.916	-5.734.805
Alero norte	Si	-5.835.561	-6.026.563	-5.594.246
	No	-5.718.872	-6.008.371	-5.626.196
Sombra temporal este/ oeste	Si	-5.777.217	-5.939.144	-5.570.540
	No	-5.777.217	-6.095.790	-5.649.901
Tipo de ventanas	U=1,3_g=0,64	-7.657.384	-7.801.596	-7.456.790
	U=2,7_g=0,78	-3.897.049	-4.233.338	-3.763.651
Transmitancia térmica muros	U = 0,2	-5.861.448	-6.034.233	-5.643.507
	U = 0,35	-5.664.012	-5.902.251	-5.520.434
	U = 0,5	-5.806.190	-6.115.917	-5.666.721
Inercia térmica	Baja	-6.252.417	-6.569.947	-6.072.922
	Alta	-5.302.017	-5.464.987	-5.147.519
Recuperación de calor	Si	-6.620.381	-6.785.184	-6.405.496
	No	-4.934.052	-5.249.750	-4.814.946
Intercambiador de calor subsuelo-aire	Si	-5.958.416	-6.269.630	-6.008.065
	No	-5.596.017	-5.765.304	-5.212.376

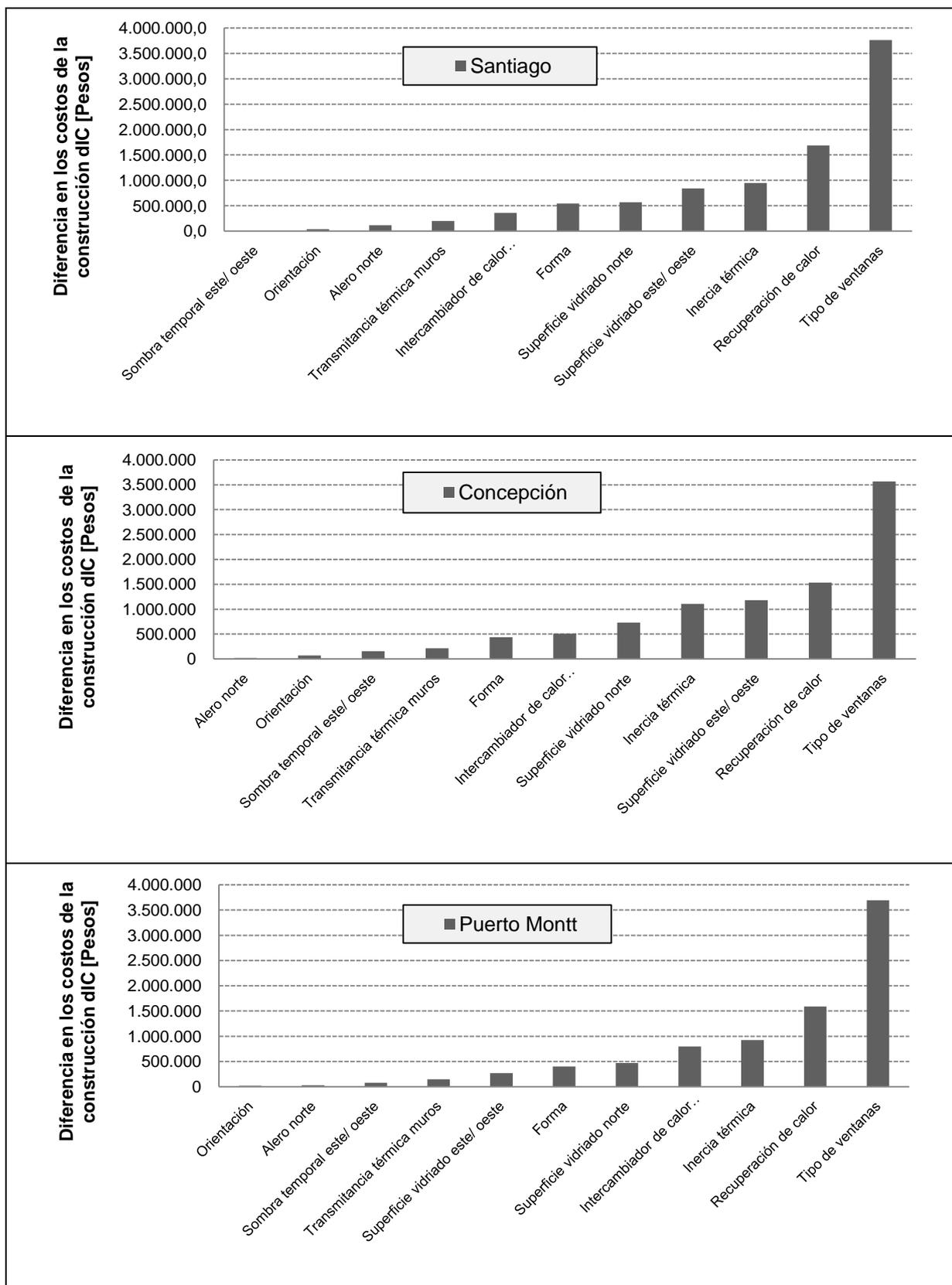


Ilustración C-2: Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia en los costos de inversión dIC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no para Santiago, Concepción y Puerto Montt ordenado por influencia (elaboración propia).

C.3 Diferencia en los costos de operación dOC

Tabla C-10: Promedio de los costos de operación anual de los casos que cumplieron el estándar Passivhaus (CP) y sus casos de referencia respectivos (RT) (elaboración propia).

	promedio OC calefacción	promedio OC refrigeración	promedio OC auxiliar
	[Pesos]	[Pesos]	[Pesos]
Santiago CP	137.837	20.647	66.814
Santiago RT	867.828	38.495	28.359
Concepción CP	220.544	405	68.076
Concepción RT	1.052.853	65	28.359
Puerto Montt CP	314.718	20	71.318
Puerto Montt RT	1.347.696	-	28.359

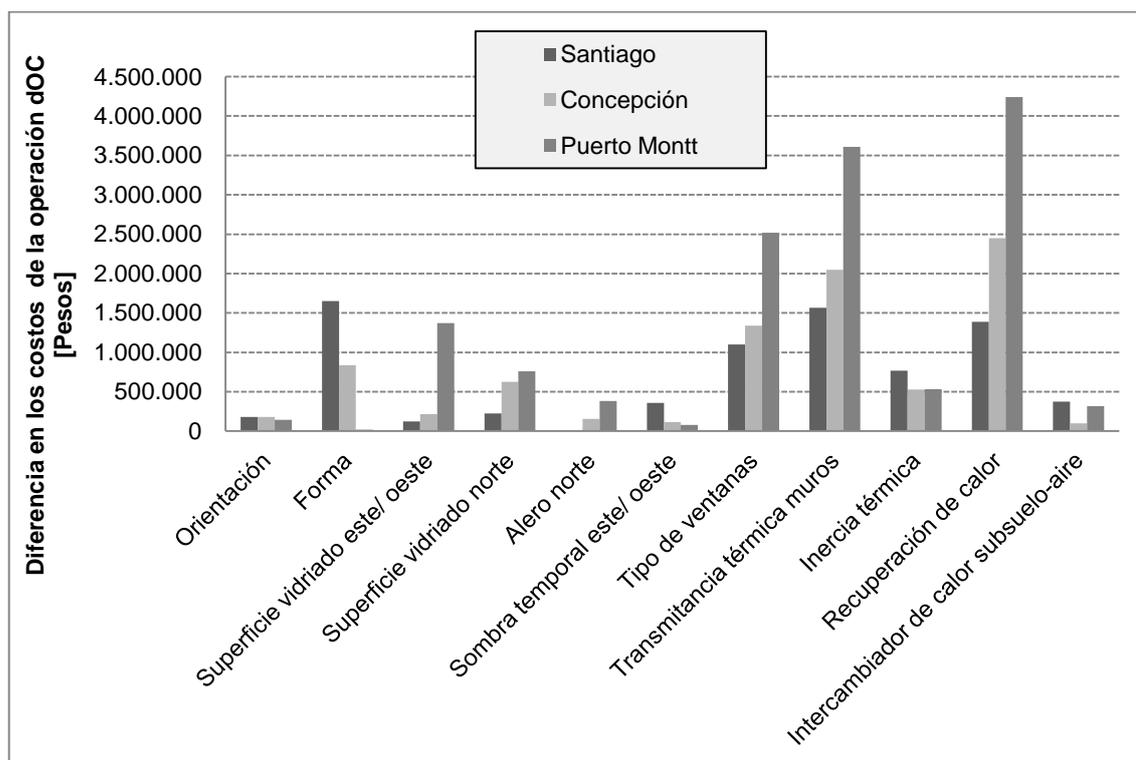


Ilustración C-3: Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia de los costos de operación dOC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no (elaboración propia).

Tabla C-11: Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia de los costos de operación dOC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no (elaboración propia).

Parámetro	Nivel	Diferencia en los costos de operación dOC (promedio)		
		[Pesos]	[Pesos]	[Pesos]
Ciudad/ Ubicación		Santiago	Concepción	Puerto Montt
Orientación	Noroeste (315°)	9.411.210	10.588.648	10.706.453
	Norte (0°)	9.358.913	10.600.504	10.757.094
	Nordeste (45°)	9.229.926	10.419.741	10.611.755
Forma	Compacto	8.507.889	10.116.924	10.682.002
	Irregular	10.158.810	10.955.671	10.701.533
Superficie vidriada este/ oeste	15% del muro	9.394.687	10.428.650	11.376.693
	40% del muro	9.272.012	10.643.945	10.006.841
Superficie vidriada norte	15% del muro	9.254.542	10.260.060	11.078.492
	40% del muro	9.267.073	10.462.898	10.318.392
	70% del muro	9.478.434	10.885.935	10.678.418
Alero norte	Si	9.332.293	10.457.386	10.501.223
	No	9.334.406	10.615.209	10.882.311
Sombra temporal este/ oeste	Si	9.513.325	10.594.876	10.652.346
	No	9.153.374	10.477.719	10.731.189
Tipo de ventanas	U=1,3_g=0,64	9.883.178	11.206.533	11.950.374
	U=2,7_g=0,78	8.783.521	9.866.062	9.433.161
Transmitancia térmica muros	U = 0,2	10.111.700	11.562.816	12.502.154
	U = 0,35	9.341.365	10.530.850	10.679.042
	U = 0,5	8.546.984	9.515.227	8.894.106
Inercia térmica	Baja	8.949.446	10.271.703	10.425.101
	Alta	9.717.253	10.800.892	10.958.434
Recuperación de calor	Si	10.028.131	11.760.363	12.812.239
	No	8.638.568	9.312.232	8.571.296
Intercambiador de calor subsuelo-aire	Si	9.521.733	10.585.773	10.533.489
	No	9.144.966	10.486.822	10.850.046

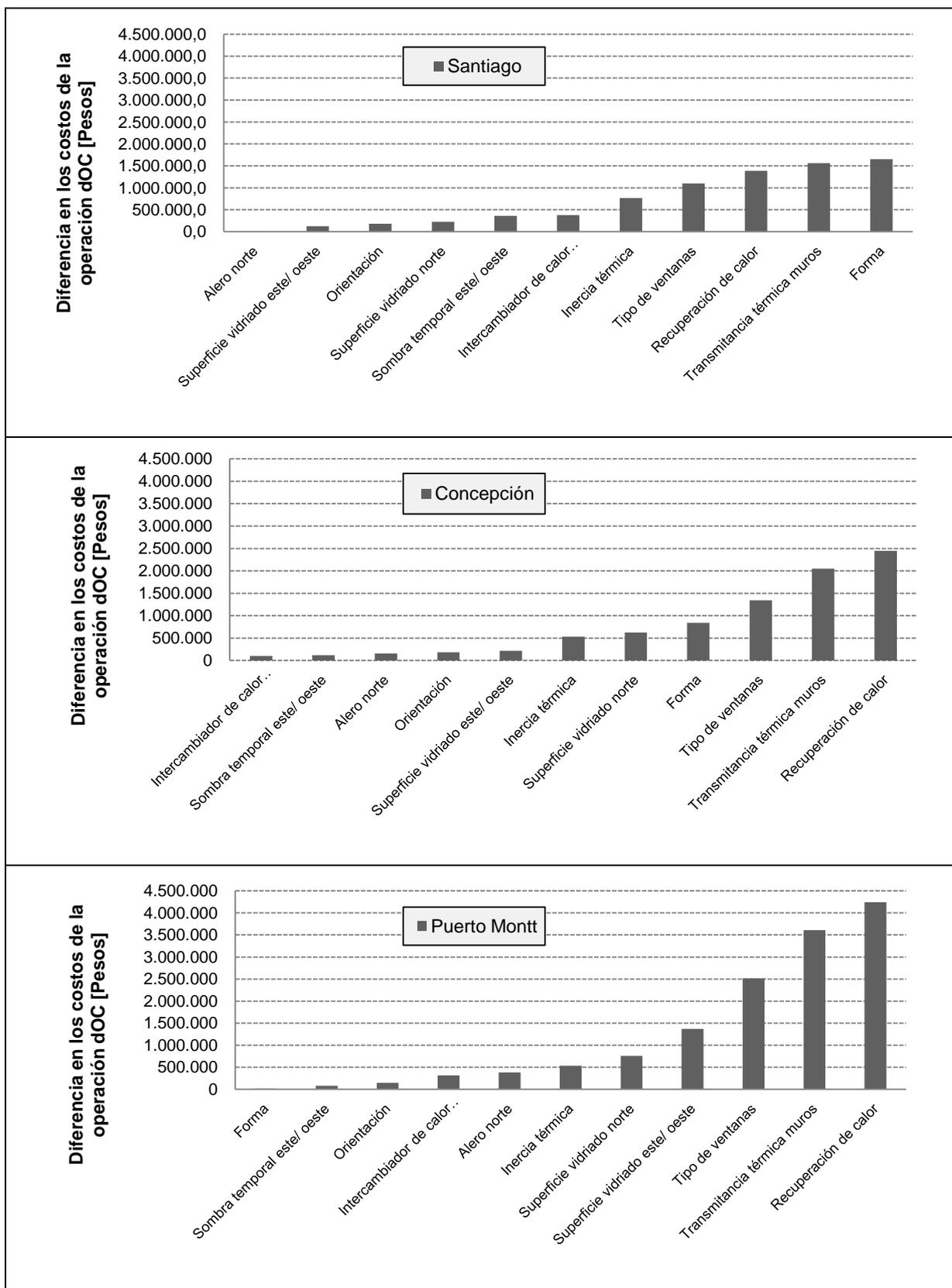


Ilustración C-4: Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia de los costos de operación dOC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no en Santiago, Concepción y Puerto Montt ordenado por influencia (elaboración propia).

C.4 Diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC

Tabla C-12: Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia de los costos del ciclo de vida dLCC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no (elaboración propia).

Parámetro	Nivel	Diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC (promedio)		
		[Pesos]	[Pesos]	[Pesos]
Ciudad/ Ubicación		Santiago	Concepción	Puerto Montt
Orientación	Noroeste (315°)	3.621.028	4.613.902	5.085.249
	Norte (0°)	3.607.627	4.565.188	5.155.842
	Nordeste (45°)	3.439.743	4.377.402	5.003.550
Forma	Compacto	3.003.670	4.317.514	5.273.672
	Irregular	4.108.596	4.720.148	4.889.422
Superficie vidriada este/ oeste	15% del muro	4.038.744	5.001.842	5.631.036
	40% del muro	3.073.521	4.035.820	4.532.058
Superficie vidriada norte	15% del muro	3.668.374	4.512.929	5.295.345
	40% del muro	3.677.649	4.634.544	5.005.682
	70% del muro	3.322.375	4.409.020	4.943.613
Alero norte	Si	3.496.732	4.430.823	4.906.978
	No	3.615.533	4.606.838	5.256.116
Sombra temporal este/ oeste	Si	3.736.109	4.655.732	5.081.806
	No	3.376.157	4.381.929	5.081.288
Tipo de ventanas	U=1,3_g=0,64	2.225.794	3.404.937	4.493.584
	U=2,7_g=0,78	4.886.472	5.632.724	5.669.509
Transmitancia térmica muros	U = 0,2	4.250.251	5.528.583	6.858.647
	U = 0,35	3.677.353	4.628.599	5.158.608
	U = 0,5	2.740.794	3.399.310	3.227.385
Inercia térmica	Baja	2.697.029	3.701.756	4.352.179
	Alta	4.415.237	5.335.906	5.810.915
Recuperación de calor	Si	3.407.750	4.975.179	6.406.743
	No	3.704.516	4.062.482	3.756.350
Intercambiador de calor subsuelo-aire	Si	3.563.317	4.316.143	4.525.424
	No	3.548.949	4.721.518	5.637.670

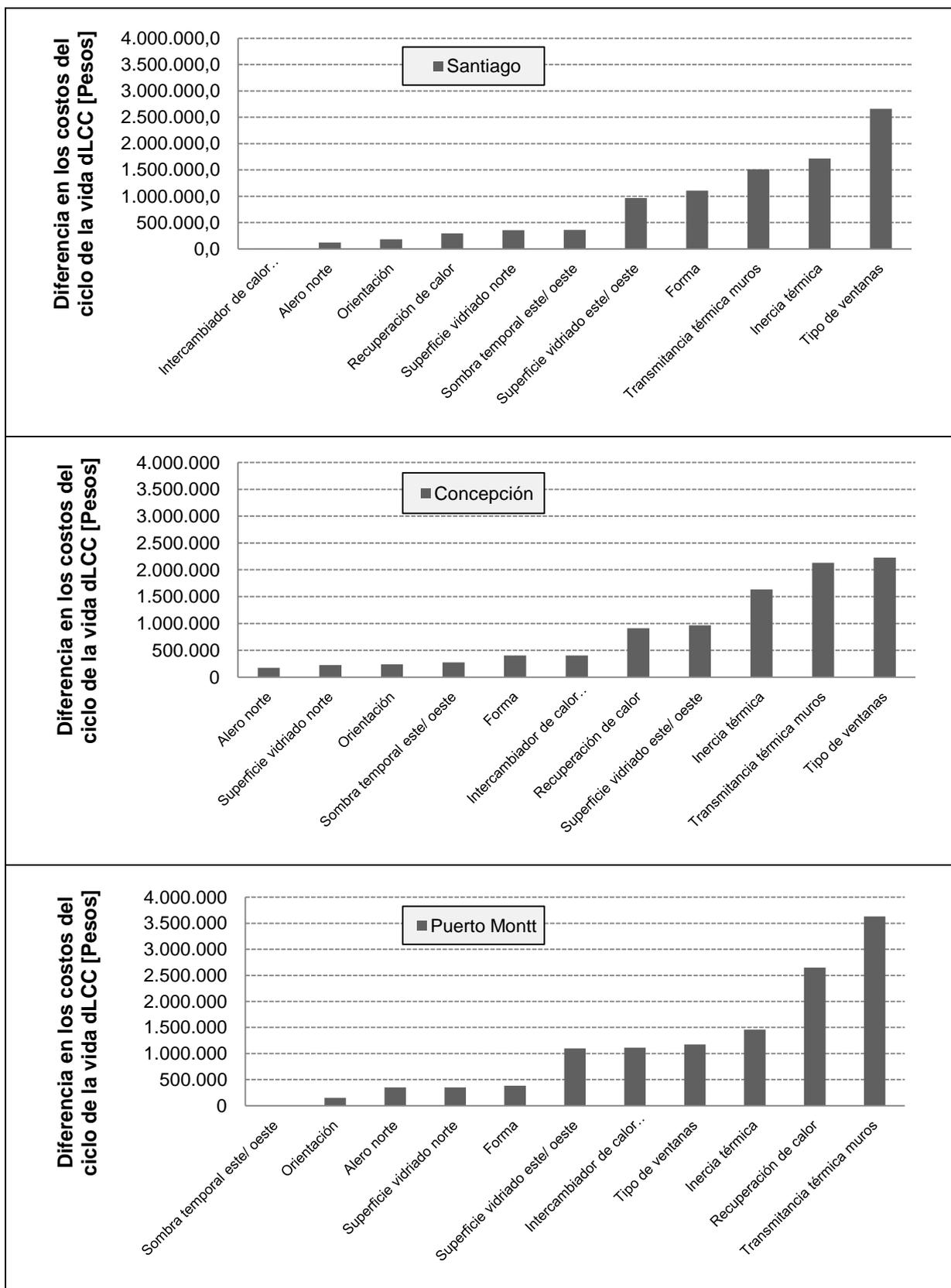


Ilustración C-5: Influencia de los parámetros y sus niveles en la diferencia de los costos del ciclo de vida dLCC de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar Passivhaus o no en Santiago, Concepción y Puerto Montt ordenado por influencia (elaboración propia).

C.5 Periodo de recuperación de la inversión en una edificación Passivhaus e influencia de diferentes niveles de los parámetros

Tabla C-13: Influencia de los parámetros y sus niveles en el periodo de la recuperación de la inversión inicial de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar (elaboración propia).

Parámetro	Nivel	Diferencia en el periodo de recuperación (promedio)		
		[Años]	[Años]	[Años]
Ciudad/ Ubicación		Santiago	Concepción	Puerto Montt
Orientación	Noroeste (315°)	11,00	9,80	9,13
	Norte (0°)	11,06	9,95	9,06
	Nordeste (45°)	11,28	10,13	9,18
Forma	Compacto	11,74	10,00	8,70
	Irregular	10,48	9,92	9,54
Superficie vidriada este/ oeste	15% del muro	9,97	8,94	8,96
	40% del muro	12,25	10,99	9,28
Superficie vidriada norte	15% del muro	10,68	9,76	9,31
	40% del muro	10,76	9,67	8,93
	70% del muro	11,90	10,46	9,13
Alero norte	Si	11,19	10,05	9,29
	No	11,04	9,88	8,95
Sombra temporal este/ oeste	Si	10,81	9,73	9,08
	No	11,41	10,20	9,16
Tipo de ventanas	U=1,3_g=0,64	14,64	12,68	11,66
	U=2,7_g=0,78	7,58	7,25	6,59
Transmitancia térmica muros	U = 0,2	10,15	8,81	7,45
	U = 0,35	10,78	9,63	8,70
	U = 0,5	12,41	11,44	11,21
Inercia térmica	Baja	12,81	11,38	10,31
	Alta	9,41	8,54	7,94
Recuperación de calor	Si	12,01	10,05	8,55
	No	10,21	9,88	9,69
Intercambiador de calor subsuelo-aire	Si	11,22	10,35	10,14
	No	11,00	9,58	8,10

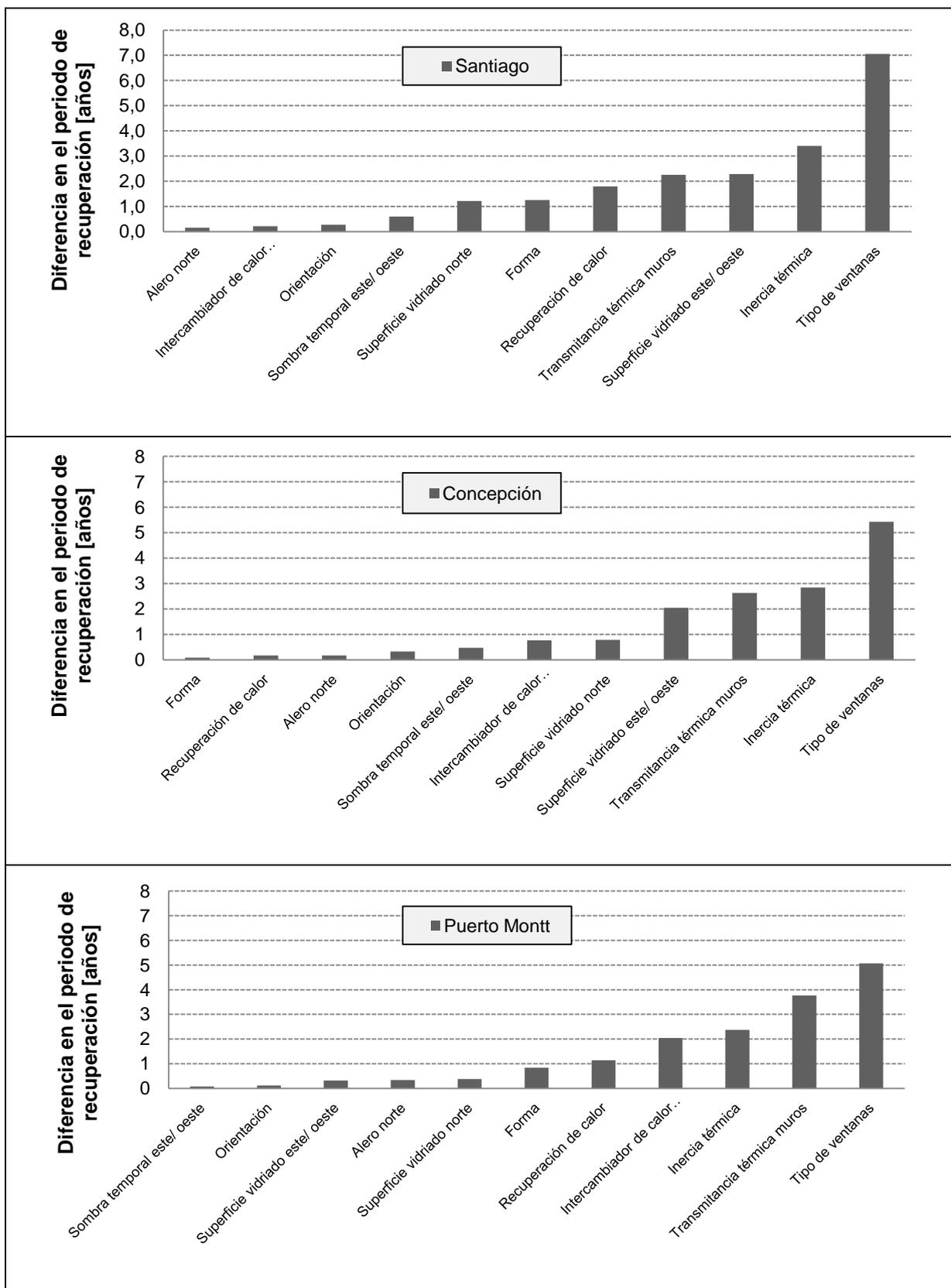


Ilustración C-6: Influencia de los parámetros y sus niveles en el periodo de la recuperación de la inversión inicial de todos los casos de estudio independientemente que cumplan con el estándar o no en Santiago, Concepción y Puerto Montt ordenado por influencia (elaboración propia).

C.6 Diferencia en los costos anuales para el usuario entre edificación Passivhaus y caso de referencia

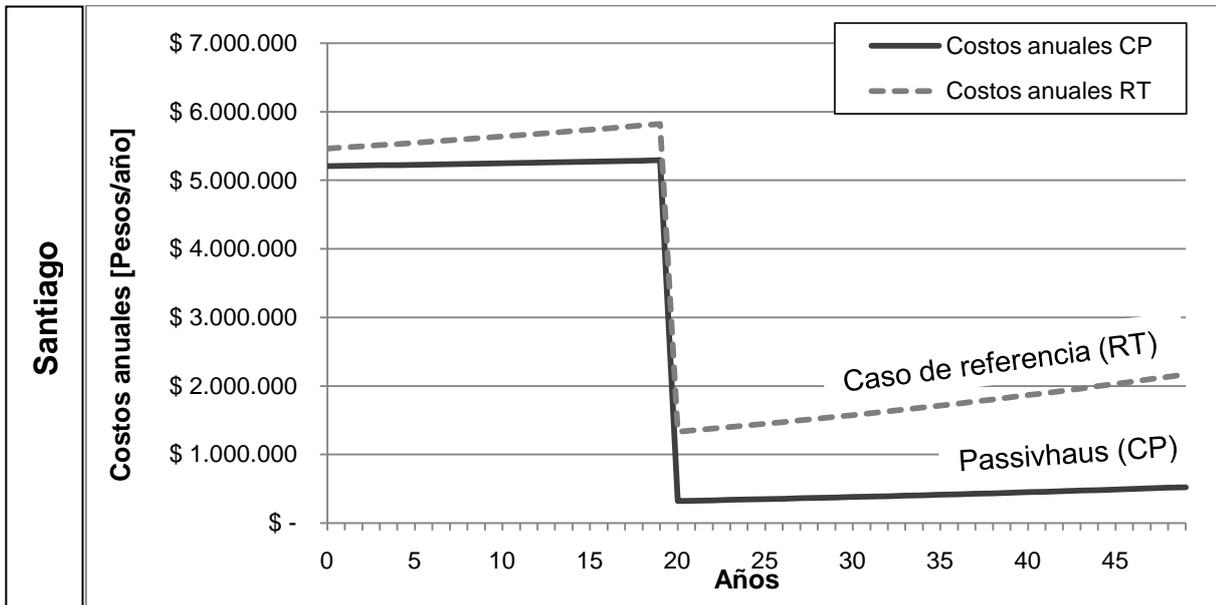


Ilustración C-7: Costos anuales promedios de las casas Passivhaus (CP) y sus casos de referencia respectivos (RT) en Santiago durante los años financiado a través de un crédito hipotecario (En base de una vivienda de 2500 UF (RT), 100 m² superficie útil, tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).

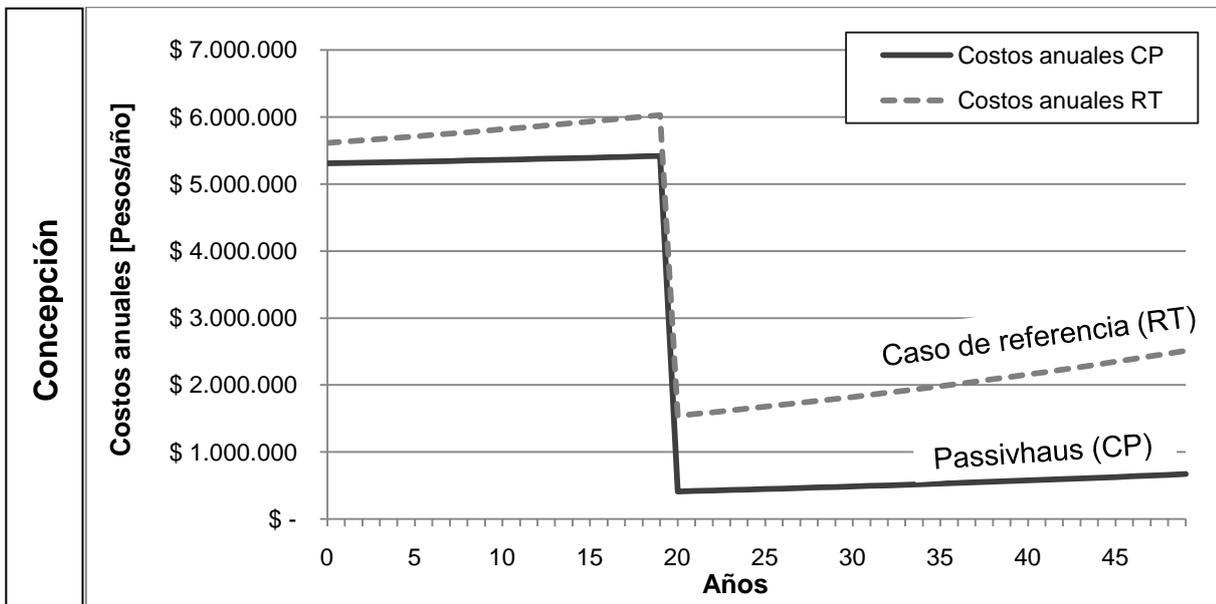


Ilustración C-8: Costos anuales promedios de las casas Passivhaus (CP) y sus casos de referencia respectivos (RT) en Concepción durante los años financiado a través de un crédito hipotecario (En base de una vivienda de 2500 UF (RT), 100 m² superficie útil, tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).

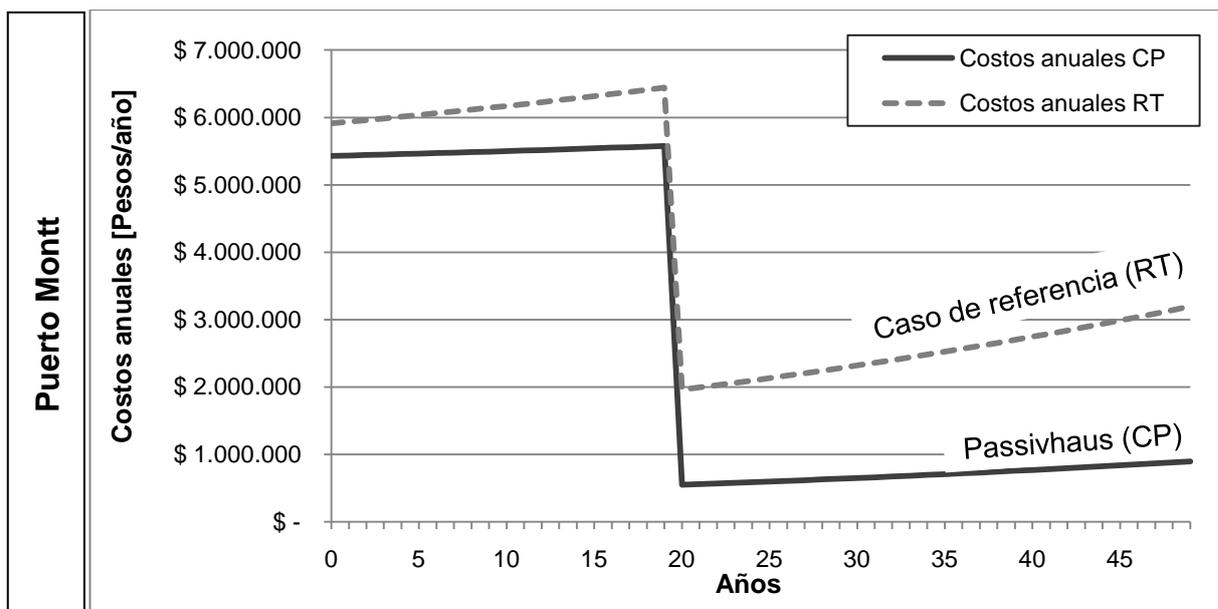


Ilustración C-9: Costos anuales promedio de las casas Passivhaus (CP) y sus casos de referencia respectivos (RT) en Puerto Montt durante los años financiados a través de un crédito hipotecario (En base de una vivienda de 2500 UF (RT), 100 m² superficie útil, tasa real 5.13% anual, 20 años, 1.7% aumento anual del precio de energía) (elaboración propia).

C.7 Los casos con la mayor rentabilidad con sus configuraciones

Tabla C-14: 10% de los casos con la mejor rentabilidad con su combinación de los niveles de los parámetros y la cantidad por nivel para Santiago (elaboración propia).

	Santiago
Orientación	mode = 0° (261), least = 45° (193)
Forma/Geometría	mode = Irregular (527), least = Compacto (164)
Superficie vidriada este/ oeste	mode = 15% (374), least = 40% (317)
Superficie vidriada norte	mode = 70% (290), least = 15% (138)
Alero norte	mode = no (384), least = si (307)
Sombra temporal este/ oeste	mode = si (410), least = no (281)
Tipo de ventanas	mode = U2_9_g0_78 (691), least = U1_3_g0_64 (0)
Transmitancia térmica muros	mode = 0.2 (387), least = 0.5 (75)
Inercia térmica	mode = alta (616), least = baja (75)
Recuperación de calor	mode = no (376), least = si (315)
Intercambiador de calor subsuelo-aire	mode = si (377), least = no (314)
Passivhaus (promedio)	mode = no (437), least = si (254)

Tabla C-15: 10% de los casos con la mejor rentabilidad con su combinación de los niveles de los parámetros y la cantidad por nivel para Concepción (elaboración propia).

	Concepción
Orientación	mode = 0° (260), least = 45° (192)
Forma/Geometría	mode = Irregular (413), least = Compacto (278)
Superficie vidriada este/ oeste	mode = 15% (393), least = 40% (298)
Superficie vidriada norte	mode = 70% (278), least = 15% (137)
Alero norte	mode = no (389), least = si (302)
Sombra temporal este/ oeste	mode = si (387), least = no (304)
Tipo de ventanas	mode = U2_9_g0_78 (691), least = U1_3_g0_64 (0)
Transmitancia térmica muros	mode = 0.2 (440), least = 0.5 (51)
Inercia térmica	mode = alta (600), least = baja (91)
Recuperación de calor	mode = si (506), least = no (185)
Intercambiador de calor subsuelo-aire	mode = no (421), least = si (270)
Passivhaus (promedio)	mode = si (616), least = no (75)

Tabla C-16: 10% de los casos con la mejor rentabilidad con su combinación de los niveles de los parámetros y la cantidad por nivel para Puerto Montt (elaboración propia).

	Puerto Montt
Orientación	mode = 0° (255), least = 45° (202)
Forma/Geometría	mode = Compacto (374), least = Irregular (317)
Superficie vidriada este/ oeste	mode = 15% (564), least = 40% (127)
Superficie vidriada norte	mode = 15% (307), least = 70% (164)
Alero norte	mode = no (373), least = si (318)
Sombra temporal este/ oeste	mode = si (355), least = no (336)
Tipo de ventanas	mode=U2_9_g0_78 (417), least=U1_3_g0_64 (274)
Transmitancia térmica muros	mode = 0.2 (562), least = 0.5 (0)
Inercia térmica	mode = alta (511), least = baja (180)
Recuperación de calor	mode = si (672), least = no (19)
Intercambiador de calor subsuelo-aire	mode = no (469), least = si (222)
Passivhaus (promedio)	mode = si (618), least = no (73)

C.8 Análisis de la sensibilidad al cambio del porcentaje del aumento del precio de la energía

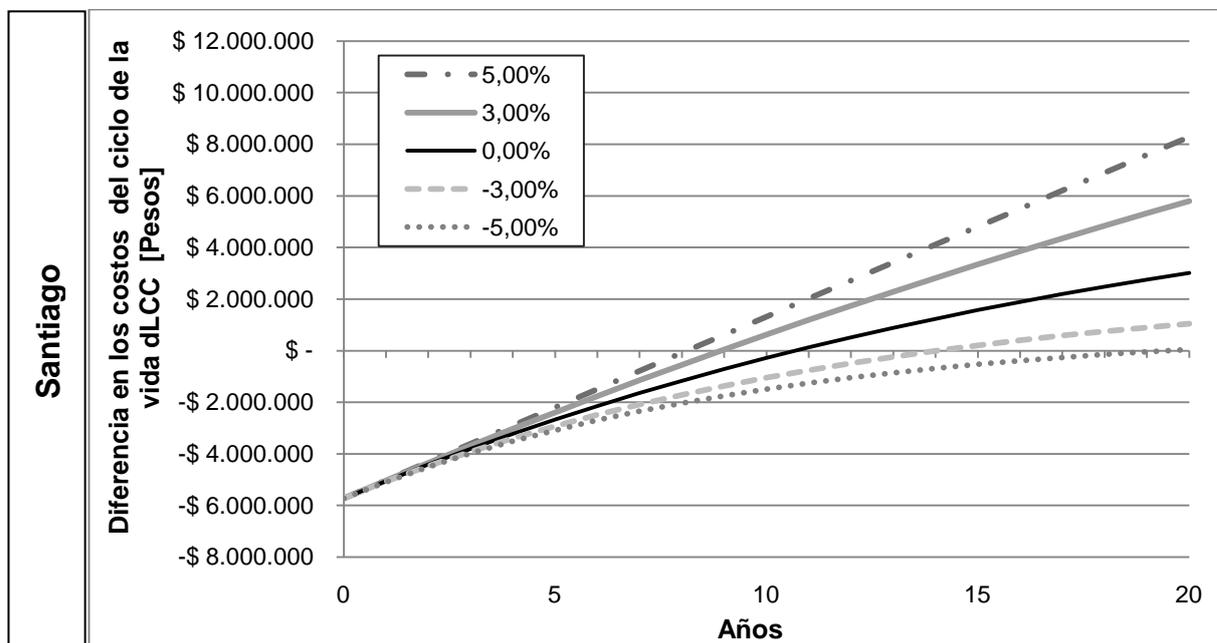


Ilustración C-10: Variación de la diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC entre una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con los valores promedio en el ejemplo de Santiago con el cambio del aumento del precio de la energía (Tasa real 5.13% anual, elaboración propia).

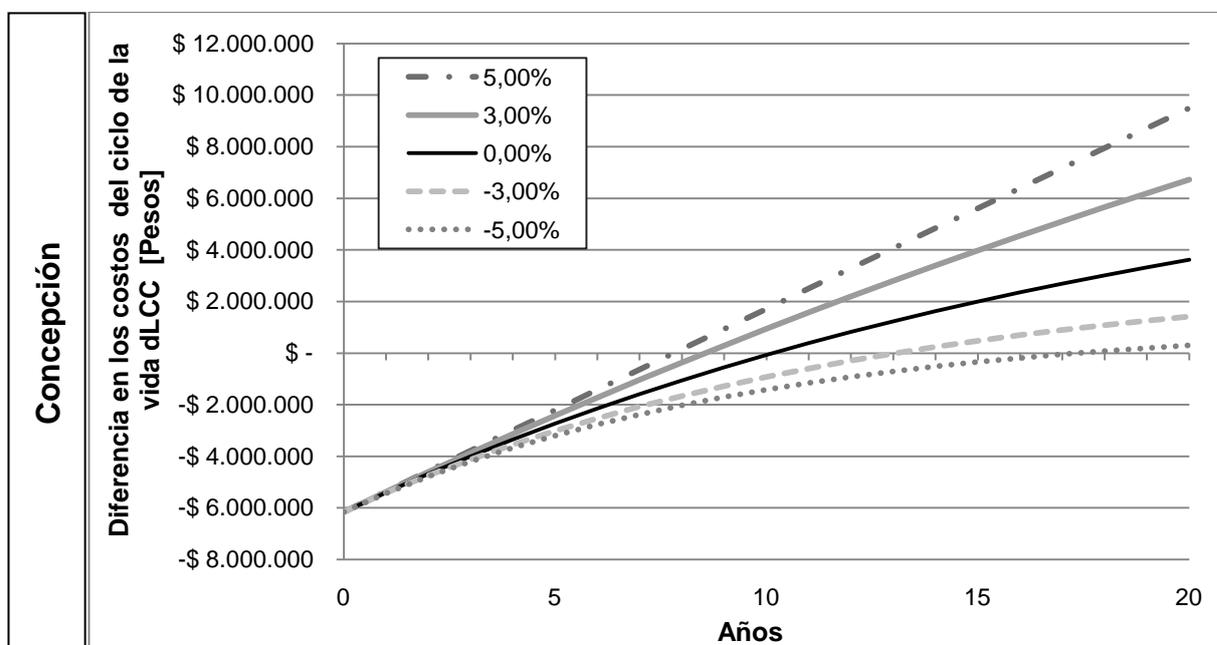


Ilustración C-11: Variación de la diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC entre una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con los valores promedio en el ejemplo de Concepción con el cambio del aumento del precio de la energía (Tasa real 5.13% anual, elaboración propia).

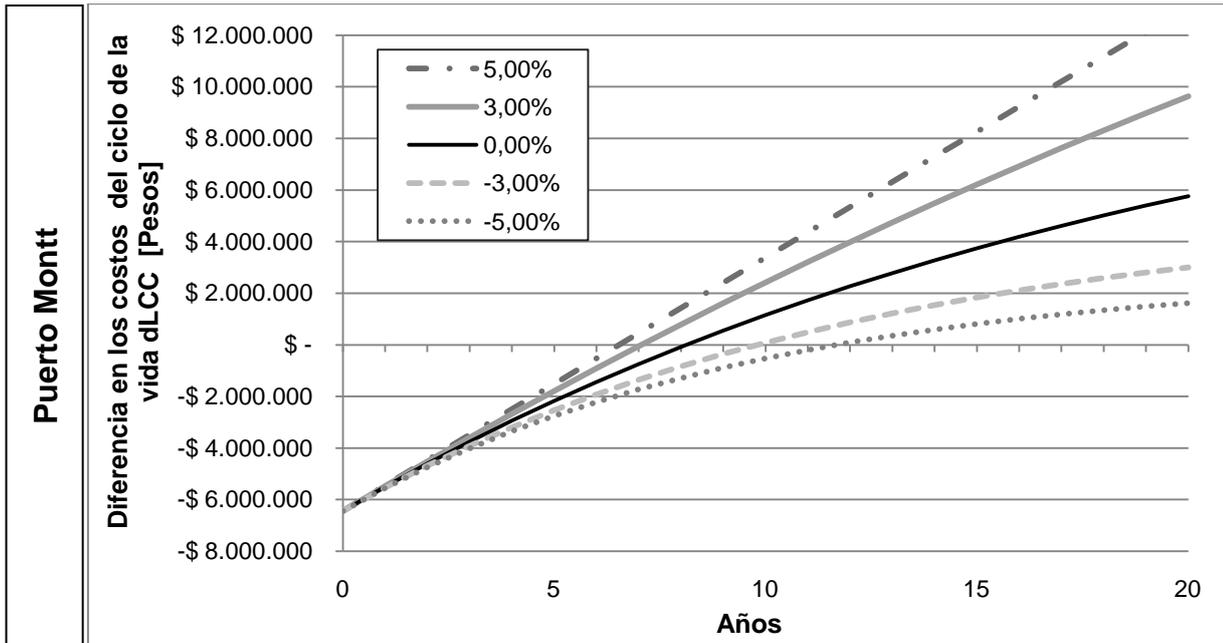


Ilustración C-12: Variación de la diferencia en los costos del ciclo de vida dLCC entre una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con los valores promedio en el ejemplo de Puerto Montt con el cambio del aumento del precio de la energía (Tasa real 5.13% anual, elaboración propia).

C.9 Análisis de la sensibilidad al cambio del sistema de calefacción en el caso de referencia (RT)

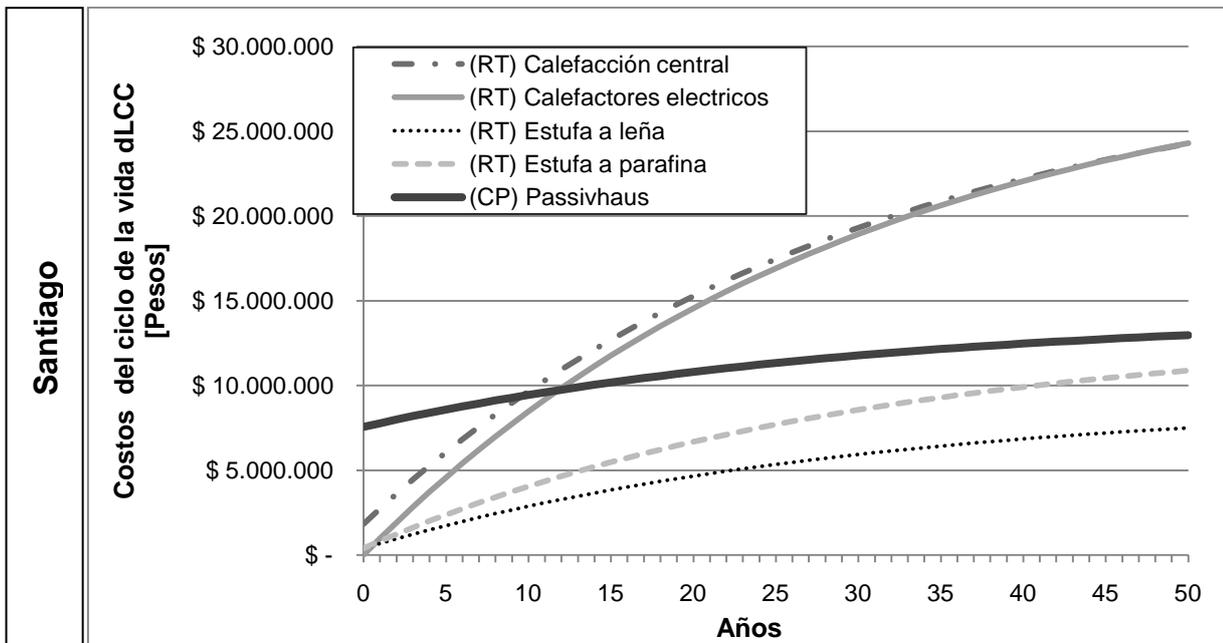


Ilustración C-13: Gráfico de los costos del ciclo de vida de una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con distintos sistemas de calefacción (valores promedio en el ejemplo de Santiago, Tasa real 5.13% anual, 1.7% aumento anual del precio de energía, elaboración propia).

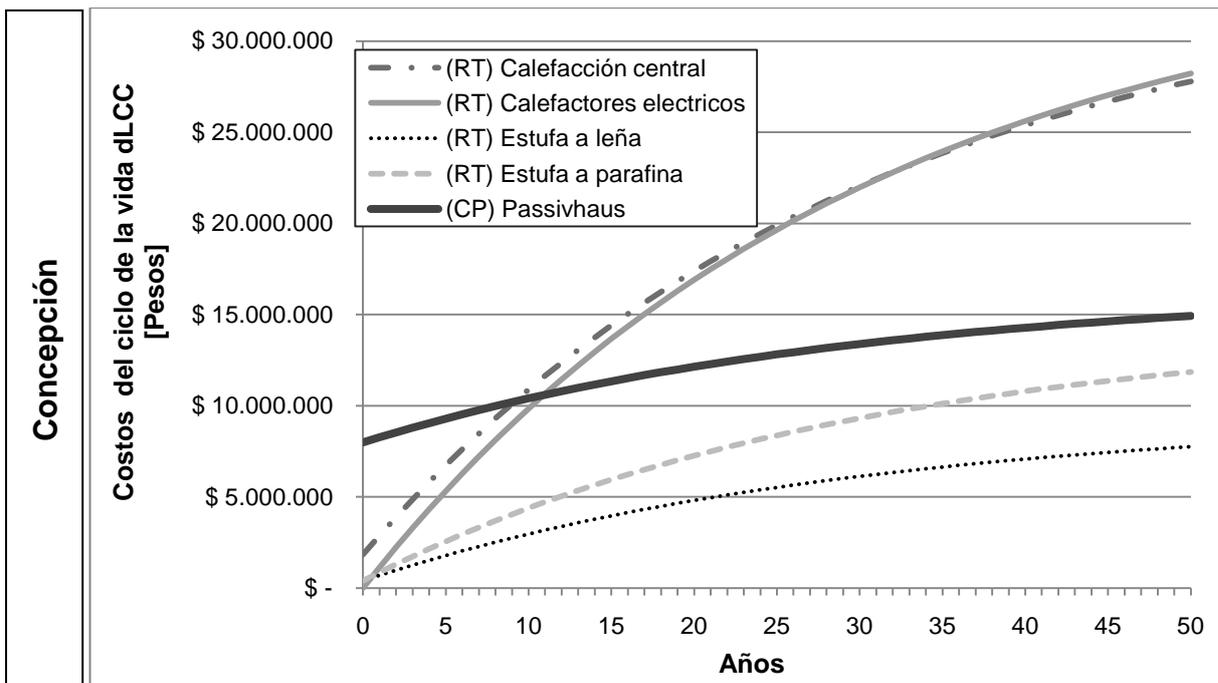


Ilustración C-14: Gráfico de los costos del ciclo de vida de una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con distintos sistemas de calefacción (valores promedio en el ejemplo de Concepción, Tasa real 5.13% anual, 1.7% aumento anual del precio de energía, elaboración propia).

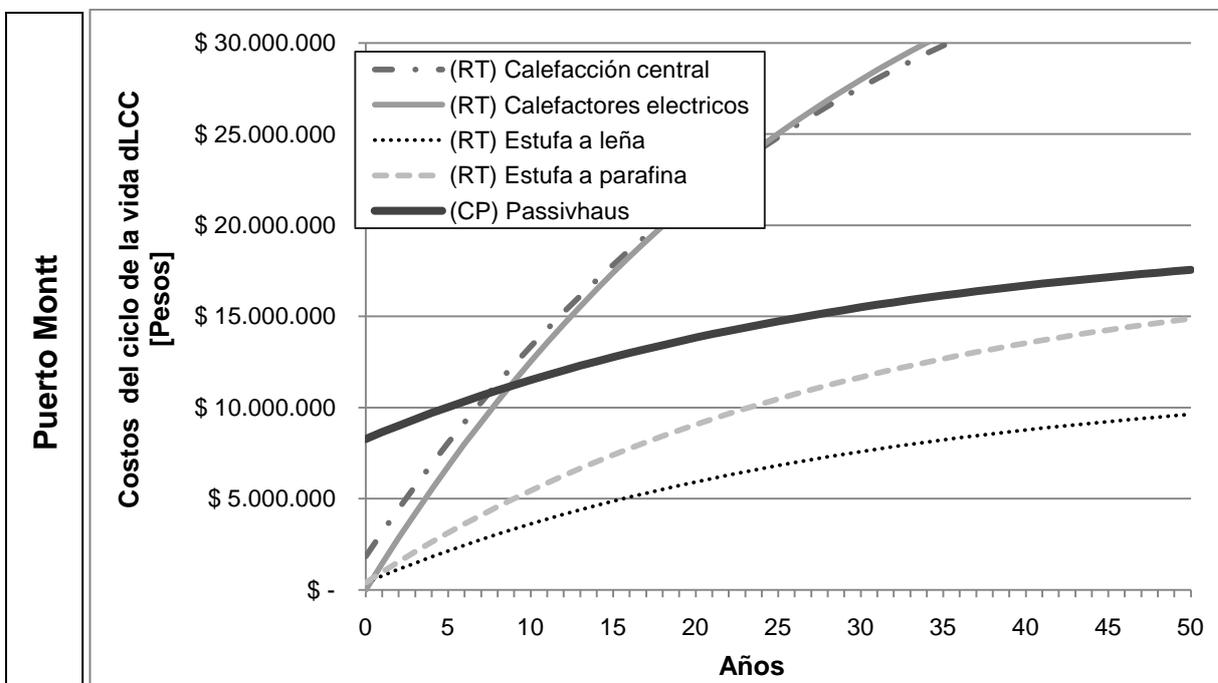


Ilustración C-15: Gráfico de los costos del ciclo de vida de una casa Passivhaus (CP) versus su respectivo caso de referencia (RT) con distintos sistemas de calefacción (valores promedio en el ejemplo de Puerto Montt, Tasa real 5.13% anual, 1.7% aumento anual del precio de energía, elaboración propia).

