



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO

**Evaluación de impacto de mejoras aplicadas a la hermeticidad al aire y
aislación térmica para la verificación de la eficiencia energética mediante
simulación térmica dinámica de dos viviendas tipo en Concepción, Chile**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN HÁBITAT SUSTENTABLE Y
EFICIENCIA ENERGÉTICA**

AUTOR: Muriel Díaz Cisternas
Arquitecta

PROFESOR GUÍA: SR. ARIEL BOBADILLA MORENO
Ingeniero Civil Mecánico
Doctor en Ciencias Aplicadas de la Ingeniería
Universidad Católica de Lovaina, Bélgica

CONCEPCIÓN, 2015

Agradecimientos

Esta tesis fue realizada en el marco del proyecto Fondef D10 I 1025 “Establecimiento de clases de infiltración aceptable de edificios para Chile”, por lo que agradezco el apoyo de todos los investigadores que participaron del proyecto quienes, de diferentes formas, aportaron a esta tesis.

Quiero agradecer especialmente a mis compañeros de trabajo por su apoyo y ayuda, Rodrigo Figueroa y Alex González que respondieron todas mis consultas sobre Software, Carolina Recart por su apoyo y compañía en el proceso, Cristián Muñoz por su tiempo y apoyo, al igual que a Rodrigo Espinoza, Roberto Arriagada y Jazmine Tiznado.

Además quiero agradecer a todas las personas que me fueron mostrando el hermoso camino de la investigación. Mis padres que con su ejemplo me mostraron el camino desde que nací, Rodrigo García que me mostro la investigación en arquitectura, Maureen Trebilcock y Beatriz Piderit que me mostraron el valor del trabajo bien hecho y la importancia de poner pasión y alegría en el trabajo. Finalmente agradezco a mi profesor guía Ariel Bobadilla por el espacio para desarrollar mis ideas.

Finalmente agradezco a Juan Carlos por su apoyo incondicional y por compartir mis sueños.

Resumen

Investigaciones recientes realizadas en el área de la física de la construcción demuestran que un porcentaje importante de las pérdidas energéticas de las viviendas en Chile se produce por infiltraciones de aire a través de las envolventes. Un aspecto no regulado, por el momento, por las ordenanzas de construcción en el país.

Esta investigación estudia, comparadamente, los impactos sobre la calidad energética que tienen las mejoras tanto en lo que se refiere a la hermeticidad al aire como a la aislación térmica de viviendas a través de un estudio de base experimental y numérico del balance energético de una vivienda típica en Concepción, Chile.

Posteriormente se evalúa la demanda energética de la vivienda utilizando simulaciones con parámetros de aislación térmica y hermeticidad adquiridos mediante mediciones, para definir su equilibrio energético.

En una segunda etapa se proponen mejoras sobre ambos parámetros para evaluar la injerencia de éstos sobre la demanda y evaluar como llegar a una demanda de energía aceptable.

Se concluye que la primera estrategia para optimizar el rendimiento energético de una vivienda, debe aplicarse a la hermeticidad. Debido al alcance de las mejoras a la hermeticidad, se hace necesario combínalas con una mayor aislación térmica de la envolvente.

Palabras claves: hermeticidad al aire, aislación térmica, infiltraciones de aire, limitación de la demanda energética, simulación térmica dinámica.

Abstract

Recent research in the area of building physics shows that a high percentage of the energy losses of Chilean homes are produced by routes other of transmission, which is the only factor regulated so far.

This research evaluates the impact on energy demand of improvements of air tightness and thermal transmittance, based on the analysis of the energy balance of a typical house in Concepcion, Chile. By studying the phenomenon of infiltration and its relation to demand, the airtightness of buildings and the typical energy demand in the area.

Energy demand of housing is then assessed using simulations with thermal transmittance and air leakage parameters acquired by measurements, to define its energy balance.

In a second step improvements on both parameters are made to evaluate the interference of these on demand and present an improvement that allows reaching acceptable energy demand.

It is concluded that as a first strategy to address the airtightness improvements are recommended, but due to its narrow scope should be combined with a substantial decrease in transmission.

Keywords: Airtightness, thermal transmittance, air infiltration, limitation of the energy demand, simulation.

Índice

CAPÍTULO 1	JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	11
1.1	HIPÓTESIS.....	12
1.1.1	<i>Objetivo general.....</i>	<i>12</i>
1.1.2	<i>Preguntas de investigación</i>	<i>12</i>
1.1.3	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>13</i>
1.2	METODOLOGÍA PROPUESTA	15
1.3	ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	20
CAPÍTULO 2	INTRODUCCIÓN A LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y SU RELACIÓN CON LA HERMETICIDAD AL AIRE DE LAS EDIFICACIONES.....	22
2.1	EFICIENCIA ENERGÉTICA EN CHILE	22
2.1.1	<i>Eficiencia energética en la vivienda en Chile.....</i>	<i>25</i>
2.1.2	<i>Estándares energéticos, reglamentación y certificaciones energéticas en Chile</i>	<i>26</i>
2.2	DEMANDA ENERGÉTICA.....	33
2.2.1	<i>Demanda energética de las viviendas en Chile</i>	<i>35</i>
2.3	CONCLUSIONES.....	41
CAPÍTULO 3	LAS INFILTRACIONES DE AIRE.....	44
3.1	CONDICIONES CLIMÁTICAS	46
3.2	HERMETICIDAD AL AIRE	49
3.2.1	<i>Indicadores para expresar la hermeticidad.....</i>	<i>50</i>
3.3	TEST DE PRESURIZACIÓN MEDIANTE VENTILADOR	51
3.4	IMPACTO DE LAS INFILTRACIONES DE AIRE	55
3.4.1	<i>Demanda energética.....</i>	<i>55</i>
3.4.2	<i>Transmisión de ruido.....</i>	<i>55</i>
3.4.3	<i>Calidad del aire</i>	<i>55</i>
3.4.4	<i>Humedad</i>	<i>56</i>
3.4.5	<i>Confort térmico.....</i>	<i>56</i>
3.5	CÁLCULO DE INFILTRACIONES DE AIRE	57
3.5.1	<i>Modelo de Persily-Kronvall</i>	<i>57</i>
3.5.2	<i>Modelo LBL</i>	<i>57</i>

3.5.3	<i>Modelo Básico de ASHRAE</i>	58
3.5.4	<i>Modelo de cálculo de infiltración LBL mejorado.</i>	60
3.6	MÉTODOS DE LIMITACIÓN DE LAS INFILTRACIONES A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL	63
3.6.1	<i>Modelo unizona</i>	63
3.6.2	<i>Modelo multizona</i>	66
3.7	CONCLUSIONES.....	69
CAPÍTULO 4 CARACTERIZACIÓN CONSTRUCTIVA DEL PARQUE DE VIVIENDAS EN LA REGIÓN DEL BIOBÍO.....		70
4.1	INTENCIÓN DE CONSTRUCCIÓN HABITACIONAL AÑO 2011	70
4.1.1	<i>Sistemas constructivos</i>	71
4.1.2	<i>Materialidad predominante en muros</i>	72
4.1.3	<i>Conclusiones</i>	73
CAPÍTULO 5 LÍNEA BASE DE HERMETICIDAD AL AIRE DE VIVIENDAS EN CHILE		74
5.1	DEFINICIÓN DE LA MUESTRA.....	74
5.2	RECOLECCIÓN DE DATOS.....	75
5.3	ANÁLISIS DE DATOS	76
5.3.1	<i>Análisis mediante gráficos box-plot entre tipologías similares</i>	76
5.3.2	<i>Prueba de Mann – Whitney</i>	83
5.3.3	<i>Establecimiento de línea base</i>	86
5.4	CONCLUSIONES.....	89
CAPÍTULO 6 DEMANDA ENERGÉTICA DE VIVIENDAS TIPO PARA LA CIUDAD DE CONCEPCIÓN		90
6.1	DEFINICIÓN DE LA MUESTRA.....	91
6.2	RECOLECCIÓN DE DATOS.....	93
6.3	CÁLCULO DE LAS INFILTRACIONES DE AIRE	95
6.4	SIMULACIÓN DE DEMANDA ENERGÉTICA DE VIVIENDAS	97
6.4.1	<i>Resultados</i>	97
6.5	CONCLUSIONES.....	99
CAPÍTULO 7 CASO DE ESTUDIO.....		100
7.1	SELECCIÓN Y DEFINICIÓN DE VIVIENDAS EN ESTUDIO.....	100

7.2	INTERROGANTES	102
7.3	DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE BORDE	103
7.3.1	<i>Software de simulación energética</i>	103
7.3.2	<i>Parámetros fijos</i>	104
7.3.3	<i>Parámetros variables</i>	106
7.4	CASO DE ESTUDIO VIVIENDA DE ALBAÑILERÍA DE LADRILLO COMBINADA CON MADERA	110
7.4.1	<i>Descripción de la vivienda</i>	110
7.4.2	<i>Mejoras propuestas</i>	115
7.5	CASO DE ESTUDIO VIVIENDA DE ENTRAMADO EN MADERA	117
7.5.1	<i>Descripción de la vivienda</i>	117
7.5.2	<i>Mejoras propuestas</i>	122
7.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE SIMULACIONES	124
7.6.1	<i>Vivienda de albañilería de ladrillo combinada con madera</i>	124
7.6.2	<i>Vivienda de entramado en madera</i>	132
7.7	CONCLUSIONES.....	140
CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES		141
8.1	CONCLUSIONES GENERALES	141
8.2	FUTURAS INVESTIGACIONES	145
ANEXOS		148
ANEXO 1: DEFINICIÓN MORFOLÓGICA-CONSTRUCTIVA DE VIVIENDAS TIPO		152
ANEXO 2: CASO DE ESTUDIO ALBAÑILERÍA COMBINADA CON MADERA.		153
ANEXO 3: CASO DE ESTUDIO ENTRAMADO DE MADERA		158
ANEXO 4: DIAGRAMA SANKEY CASO BASE VIVIENDA ALBAÑILERÍA DE LADRILLO Y MADERA.....		161
ANEXO 5: DIAGRAMA SANKEY VIVIENDA ALBAÑILERÍA DE LADRILLO Y MADERA QUE CUMPLE CON NTM 011 ..		162

Índice de figuras

Figura 1: Esquema del proyecto de justificación.	19
Figura 2: a) Diagrama Sankey representando el balance energético en régimen de calefacción de una edificación tipo. b) representación esquemática de ganancias y pérdidas a través de la envolvente.....	34
Figura 3: Infiltraciones y exfiltraciones de aire en una edificación.	45
Figura 4: Zonificación por grados día de infiltración.....	48
Figura 5: BlowerDoor modelo Minneapolis, disponible en CITEC UBB.....	52
Figura 6: Equipo de ventana utilizado en HochschuleBieberach.....	52
Figura 7: Lápiz de humo utilizado para encontrar puntos de fuga durante el test de presurización BlowerDoor.....	53
Figura 8: Termografía combinada con test de presurización que permite ver la fuga de aire por tapa de entretecho.....	53
Figura 9: Técnica de identificación de puntos de fuga con humo.....	54
Figura 10: Representación esquemática del modelo LBL de infiltración.....	58
Figura 11: Distribución porcentual de materialidad predominante en muros en edificación habitacional de Concepción.....	73
Figura 12: Diagrama de caja para los 189 datos, según año y materialidad.....	77
Figura 18: Línea base de la permeabilidad al aire promedio según materialidad predominante en muros.....	87
Figura 19: Ficha de vivienda tipo simulada.....	94
Figura 20: Demanda energética diferenciada para viviendas tipo en Concepción.....	98
Figura 21: Materiales y sistemas de uso predominante en construcciones de viviendas en la región del Biobío año 2011.....	101
Figura 22: Hermeticidad al aire promedio por materialidad predominante en muros y valores esperados (95% de confianza).....	102
Figura 23: Fotografía de vivienda de albañilería de ladrillo combinada con madera.....	110
Figura 24: Plantas de primer y segundo piso de vivienda en estudio.....	111
Figura 25: Elevaciones norte y este.....	111
Figura 26: Hermeticidad al aire de vivienda albañilería de ladrillo combinada con madera.....	114
Figura 27: Fotografía de vivienda de entramado en madera.....	117
Figura 28: Planta de vivienda en estudio.....	118
Figura 29: Corte constructivo.....	118
Figura 30: Hermeticidad al aire de vivienda de entramado de madera.....	121

Figura 31: Demanda energética para caso Base con infiltración normalizada y valor normalmente utilizado en simulaciones125

Figura 32: Demanda energética para los cinco escenarios de mejora a la aislación térmica de la envolvente con hermeticidad medida en vivienda de 12,3 (1/h)126

Figura 33: Demanda energética total para cada caso simulado. Según caso y hermeticidad de la envolvente127

Figura 34: Demanda de calefacción v/s enfriamiento para todos los casos simulados.128

Figura 35: Diagrama Sankey caso base vivienda albañilería de ladrillo y madera129

Figura 36: Diagrama Sankey caso 5_8 vivienda albañilería de ladrillo y madera que cumple con NTM 011.....130

Figura 37: Demanda energética para caso Base con infiltración normalizada y valor normalmente utilizado en simulaciones132

Figura 38: Demanda energética para los cinco escenarios de mejora a la aislación térmica de la envolvente con hermeticidad medida en vivienda de 20 (1/h)134

Figura 39: Demanda energética total para cada caso simulado. Según caso y hermeticidad de la envolvente135

Figura 40: Demanda de calefacción v/s enfriamiento para todos los casos simulados.136

Figura 41: Diagrama Sankey caso base vivienda entramado de madera.137

Figura 42: Diagrama Sankey caso 5_8 vivienda entramado de madera que cumple con NTM 0 11138

Índice de tablas

Tabla 1: Zonificación térmica según NTM 011, 2014 en revisión.	28
Tabla 2: Transmitancia térmica máxima para complejo de techumbre, muro, piso ventilado y puerta, y resistencia térmica mínima para materiales de aislación en pisos en contacto con el terreno en edificaciones de uso residencial, educación y salud.	29
Tabla 3: Porcentaje máximo de superficie de complejo de ventanas por orientación en edificaciones de uso residencial	30
Tabla 4: Clase de infiltración de aire máxima permitida para la envolvente térmica de las edificaciones de uso residencial, educación y salud, excluyendo de ésta los complejos de puerta y ventana.....	31
Tabla 5: Grado de estanquidad al aire mínima para complejos de puerta y ventana de las edificaciones de uso residencial, educación y salud. Según NCh888 Of.2000.....	32
Tabla 6: Clases de permeabilidad al aire de ventanas.	32
Tabla 7: Demanda energética de calefacción en viviendas.....	36
Tabla 8: Tipologías de vivienda y demanda energética asociada a envolvente que cumple con la RT en la ciudad de Concepción.	37
Tabla 9: Demanda energética de viviendas sociales según Bustamante, 2009	38
Tabla 10: Demanda energética de viviendas según Celis, 2012.....	39
Tabla 11: Rangos de grados día para zonificación.	47
Tabla 12: Zonificación por grados día de infiltración del territorio nacional	48
Tabla 13: Coeficientes stack Cs del modelo LBL.....	59
Tabla 14: Clases de protecciones locales	59
Tabla 15: Coeficientes de viento Cw del modelo LBL.....	60
Tabla 16: Multiplicador de velocidad del viento G	62
Tabla 17: Coeficientes de Stack y Viento para modelo de cálculo de infiltración LBL mejorado.....	62
Tabla 18: Clasificación de ventanas según norma DIN EN 12207:1 2000-06	65
Tabla 19: Clase de Permeabilidad al Aire según DIN EN 207-1: 2000-06.....	65
Tabla 20: Porcentaje de incidencia de la superficie por destino en cuatro provincias representativas.....	71
Tabla 21: Participación de los distintos materiales predominantemente en muros en los distintos sistemas de construcción utilizados el año 2011 a nivel nacional.....	72

Tabla 22: Comparación de medianas entre años.....	84
Tabla 23: Comparación de medianas entre regiones utilizando el método A	85
Tabla 24: Comparación de medianas entre agrupación y año	86
Tabla 25: Características diferenciadoras para el estudio de la demanda energética de viviendas .	91
Tabla 26: Definición de tipologías en estudio para todo el territorio de Chile.	91
Tabla 27: Tipologías de sistemas constructivos que representan más del 70 % de las unidades habitacionales inscritas el año 2011 en la provincia de Concepción.....	92
Tabla 28: Valores promedio de área ELA por m ² de envolvente para distintas materialidades	95
Tabla 29: Coeficientes de infiltración normalizada por tipología constructiva (1/h) en la ciudad de Concepción.	96
Tabla 30: Demanda energética de construcciones habitacionales en Concepción.	97
Tabla 31: Horario de Ventilación para calidad del aire por recinto	105
Tabla 32: supuestos de ocupación, rango de confort y temporadas de demanda	106
Tabla 33: Tipos de vidrios.....	107
Tabla 34: Casos de mejoras a la transmitancia térmica de la envolvente.	107
Tabla 35: Valores de hermeticidad utilizados	108
Tabla 36: Capas que componen las soluciones constructivas de los elementos opacos la vivienda	112
Tabla 37: Superficie y orientación de ventanas	113
Tabla 38: Aislación térmica de superficies opacas y vidriadas de casos mejorados	115
Tabla 39: Infiltración normalizada mensual.....	116
Tabla 40: Capas que componen las soluciones constructivas de los elementos opacos la vivienda	119
Tabla 41: Superficie y orientación de ventanas	120
Tabla 42: Aislación térmica de superficies opacas y vidriadas de casos mejorados	122
Tabla 43: Infiltración normalizada mensual.....	123
Tabla 44: Muro primer piso caso base	153
Tabla 45: Muro segundo piso caso base	153
Tabla 46: Techo caso base	154
Tabla 47: cielo caso base.....	154
Tabla 48: Muro primer piso mejorado	155

Tabla 49: Muro primer piso mejorado	155
Tabla 50: Techo mejorado	156
Tabla 51: cielo mejorado.....	156
Tabla 52: piso mejorado	156
Tabla 53: Muro exterior caso base.....	158
Tabla 54: Techo caso base	158
Tabla 55: cielo caso base.....	159
Tabla 56: piso mejorado	159
Tabla 57: Muro primer piso mejorado	159
Tabla 58: cielo mejorado.....	160
Tabla 59: piso mejorado	160

Capítulo 1 Justificación de la investigación

Lograr viviendas con una demanda de energía controlada y un consumo energético adecuado a las condiciones climáticas de Chile, es una preocupación a nivel de gobierno y de las personas. El Ministerio de Vivienda y Urbanismo junto con otras entidades de gobierno, ha desarrollado un trabajo tendiente a mejorar el aprovechamiento de energía en viviendas a través de normativas prescriptivas que exigen el cumplimiento de valores de transmitancia térmica de algunos elementos constituyentes de la envolvente como ventanas, muros y techos con un impacto que no ha sido debidamente estudiado, pero con una preocupación sobre el poco impacto que estas medidas han tenido en el uso de energía.

Recientes investigaciones realizadas en el marco del proyecto Fondef D10 I 1025 “Establecimiento de clases de infiltración aceptable de edificios para Chile”, han demostrado la baja hermeticidad al aire de las construcciones en Chile (promedio de 12,9 cambios de aire por hora a 50 Pa), lo que podría explicar de cierta forma, el bajo impacto de las mejoras a la transmisión de calor por la envolvente en la demanda energética.

La presente investigación se centra en la búsqueda de mejoramientos energéticos, a través de la modificación de cualidades físicas de la envolvente, que permitan optimizar la eficiencia energética y calidad habitable de las viviendas en la región del Biobío considerando el estado del arte actual de la tecnología y técnicas aplicadas a la construcción.

Tomando como base la nueva información disponible se propone estudiar la porción de la demanda energética correspondiente a las infiltraciones, evaluando el balance de energía utilizado para mantener una vivienda a temperatura de confort. Es necesario considerar que el balance energético de una vivienda depende de varios factores, por lo que conocer la relación porcentual de estos factores y su valor en términos de demanda de energía permite orientar la búsqueda de mejoras tendientes a lograr una menor demanda energética. Considerando lo anteriormente descrito se propone la siguiente hipótesis:

1.1 Hipótesis

En el estado actual de la calidad energética del parque de viviendas en la ciudad de Concepción, aplicar mejoras a la hermeticidad al aire de la envolvente de algunos tipos de vivienda tendrá un mayor impacto en la disminución de la demanda energética que las mejoras aplicadas a la envolvente térmica. Lográndose una disminución de más de un 15 % de la demanda.

1.1.1 Objetivo general

Evaluar los impactos sobre la calidad energética de mejoras a la hermeticidad al aire y aislación térmica de viviendas en la ciudad de Concepción, basados en el análisis del balance energético de dos casos de estudio de viviendas, con el propósito de orientar las estrategias de mejoramiento energético y ambiental.

1.1.2 Preguntas de investigación

Para dar respuesta al objetivo antes mencionado se plantean las siguientes preguntas de investigación, a las que se les da respuesta mediante los objetivos específicos que se presentan a continuación de las mismas.

1. ¿Cómo se define la fenomenología de las infiltraciones? ¿cómo impactan en la demanda energética y qué medidas se han tomado en el ámbito nacional e internacional para su regulación?
2. ¿Qué materialidades predominan en la construcción de nuevas viviendas en la provincia de Concepción y qué niveles de hermeticidad presentan las envolventes?
3. ¿Cómo se comportan energéticamente las viviendas en la provincia de Concepción?
4. ¿Cómo impactan las infiltraciones de aire en la demanda energética de viviendas típicas construidas en Concepción?

5. ¿Cómo impactan las mejoras en la hermeticidad al aire y en la aislación térmica de la envolvente en la demanda energética de viviendas tipo en la ciudad de Concepción?
6. ¿Cuánto afectan a la demanda energética las mejoras propuestas por la Norma técnica MINVU NTM 011/3 ¹ respecto de la hermeticidad al aire y la transmisión de calor? En términos porcentuales y demanda total.

1.1.3 Objetivos específicos

Objetivo específico 1: Estudiar la fenomenología de las infiltraciones, su impacto en la demanda energética y las regulaciones internacionales asociadas, mediante la revisión del estado del arte.

Objetivo específico 2: Caracterizar el parque de viviendas construidas identificando las materialidades y configuraciones arquitectónicas con mayor representación porcentual respecto de las construcciones autorizadas en la provincia de Concepción en los últimos años, mediante el análisis de bases de datos estadísticos.

Objetivo específico 3: Evaluar la hermeticidad al aire de viviendas construidas en la provincia de Concepción en los últimos años, mediante test de presurización mediante ventilador.

Objetivo específico 4: Comparar la demanda energética de viviendas tipo para la ciudad de Concepción con estudios anteriores y mediciones in situ.

Objetivo específico 5: Calcular la demanda energética de viviendas tipo para la ciudad de Concepción, mediante simulación energética de casos de estudio.

¹ Anteproyecto de Norma Técnica MINVU NTM 011 2014: “Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento ambiental de las edificaciones”. Que propone valores de aislación térmica exigible en Parte 2: Comportamiento higrotérmico y de hermeticidad al aire exigibles en Parte 3: Calidad del aire interior.

² En la zona centro-sur del país los valores promedio de temperatura interior en invierno, en las viviendas

Objetivo específico 6: Evaluar el impacto de mejoras a la hermeticidad al aire y la aislación térmica de muros sobre la demanda energética de las viviendas representativas del construir en Concepción, mediante el estudio de casos.

Objetivo específico 7: Evaluar el impacto de los valores límite propuestos por la NTM 011 sobre la demanda energética de las viviendas representativas del construir en Concepción, mediante el estudio de casos.

1.2 Metodología propuesta

La metodología propuesta se aborda por etapas, cada una de las cuales está compuesta por macro actividades generales, las que dan respuesta a los objetivos planteados, que se explican a continuación:

Etapa 1: Revisión del estado del arte

1. Estudiar la fenomenología de las infiltraciones, su impacto en la demanda energética y las medidas tomadas nacional e internacionalmente para su limitación.

Se revisó una bibliografía general sobre las infiltraciones de aire, su relación con el clima y con la materialidad y el nivel de industrialización de la construcción. Se consultó información respecto del impacto que las infiltraciones de aire tienen sobre la demanda energética, según estudios internacionales, y normativas referentes a la hermeticidad de las edificaciones en el medio nacional e internacional .

2. Caracterizar el parque de viviendas construidas identificando las materialidades y configuraciones arquitectónicas con mayor representación porcentual respecto de las construcciones autorizadas en la provincia de Concepción en el año 2011.

Se revisaron los datos estadísticos contenidos en el informe de construcción del Instituto Nacional de Estadísticas y los datos desagregados correspondientes al año 2011, concentrándose en la materialidad predominante en muros y configuración arquitectónica de las viviendas: número de pisos y tamaño promedio.

Etapa 2: Evaluaciones del estado actual de la hermeticidad del parque habitacional recientemente construido y su impacto en la demanda energética calculada.

3. Evaluar la hermeticidad al aire de viviendas construidas en la provincia de Concepción después de la entrada en vigencia de la Reglamentación Térmica.

Se evaluó la hermeticidad al aire de una muestra representativa de las edificaciones construidas en los años 2007 y 2010 en la provincia de Concepción. Se estudió su representatividad, se desagregaron de acuerdo con la materialidad predominante en muros, llegando a establecer el valor de la línea base de hermeticidad al aire del parque, su desviación y valores máximos y mínimos.

4. Calcular la demanda energética de viviendas tipo para la ciudad de Concepción y comparar con estudios anteriores y mediciones in situ.

Utilizando los valores de hermeticidad promedio por materialidad predominante en muros se calculó la demanda energética de viviendas tipo definidas para el estudio, las que se comparan con estudios anteriores y mediciones realizadas in situ, para evaluar las diferencias entre los supuestos utilizados y los valores que consideran la hermeticidad al aire como pérdidas de energía.

Etapa 3: Caso de estudio

5. Seleccionar y Definir vivienda en estudio de acuerdo con la representatividad de la materialidad, la cantidad de viviendas construidas en serie y la disponibilidad de información.

Se eligen dos viviendas representativas del 67% de la construcción en la región, considerando los parámetros de tamaño y materialidad predominante en muros. La vivienda cumple con la Reglamentación Térmica, por lo que se entiende que fue construida después del año 2007.

6. Elaborar listado de preguntas para contestar con el estudio

Se identifican las preguntas o interrogantes principales a las que se quiera dar respuesta con el estudio de la demanda energética del caso base seleccionado.

7. Localizar fuente de datos

Se seleccionaron viviendas tipo de las que se tenía información planimétrica y de ensayos de hermeticidad al aire, información indispensable para el estudio. La fuente de información utilizada fue la línea base de hermeticidad al aire generada por CITEC UBB y DECON UC para el proyecto FONDEF D10 I 1025.

8. Identificar software disponible para el cálculo de la demanda energética

El software de simulación utilizado permite el cálculo de infiltraciones de aire hora a hora, considerando factores climáticos como la velocidad del viento y la temperatura del aire. Se eligió un software con las características antes mencionadas considerando disponibilidad y facilidad de uso, y también considerando la disponibilidad de tutorías y asesoramiento de expertos.

9. Realizar simulación caso base

Se realizó una simulación base o de referencia (para cada caso de estudio) con la cual se efectuaron las comparaciones y evaluación de mejoras. La simulación base está dada por las condiciones de construcción de la vivienda y factores predefinidos de ocupación. La infiltración normalizada fue calculada a partir de los valores de hermeticidad al aire medidos en obra.

Se definieron paquetes de medida para mejorar tanto la aislación térmica de la envolvente como la hermeticidad al aire de la misma, los que fueron simulados.

10. Evaluar si es más pertinente mejorar la hermeticidad o la transmitancia o ambas y hasta qué niveles para los casos de estudio.

Para poder validar la hipótesis propuesta es necesario evaluar qué medidas tienen un impacto más significativo sobre la demanda energética, por lo que se evaluaron distintos escenarios tanto de aislación térmica como de hermeticidad y sus correspondientes combinaciones.

11. Comparar los resultados de simulaciones con las recomendaciones dadas por la NTM 011/2 y 011/3.

Se compararon los resultados con las propuestas de mejoras realizadas por la normativa NTM 011 2014 en estudio, con el fin de validar o no dichas mejoras y conocer su impacto en las dos viviendas tipo estudiadas.

12. Elaborar conclusiones generales

Se elaboraron conclusiones respecto de la metodología utilizada, los resultados de simulaciones para caso base y mejoras tanto en la hermeticidad como en la transmisión.

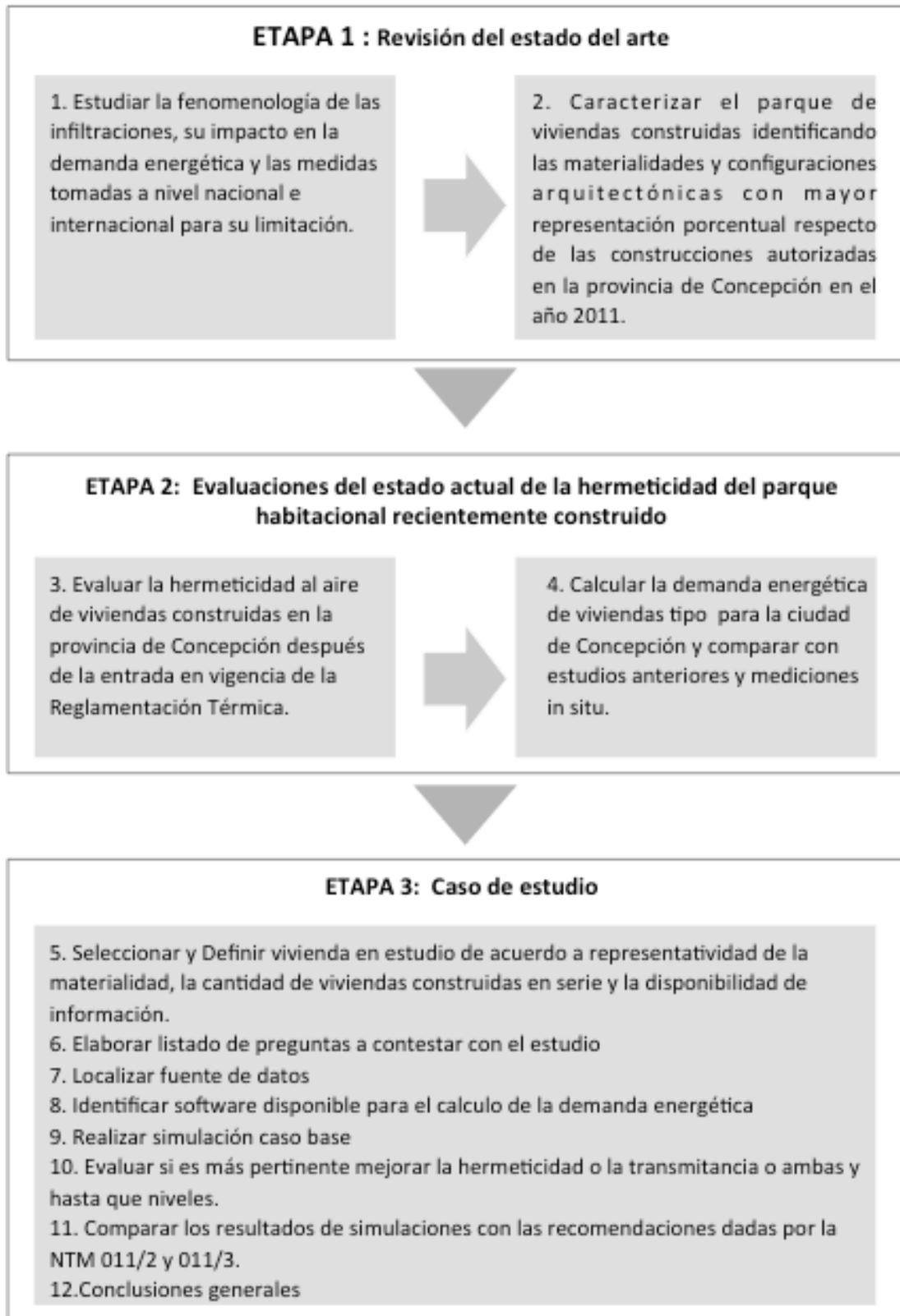


Figura 1: Esquema del proyecto de justificación.

1.3 Estructura del documento

El trabajo se estructura en ocho capítulos que presentan las etapas de la investigación, los elementos que no se consideraron indispensables en el cuerpo del documento son referidos en el texto y se presentan en el apartado Anexos.

El primer capítulo presenta la organización general de la investigación, y el marco metodológico general. La metodología utilizada para cada etapa se describe al comienzo de cada capítulo.

En el segundo capítulo se describe el marco teórico de la investigación, el estado del arte de la eficiencia energética en Chile y los estándares y normativas relativas a la demanda energética en el país.

En el tercer capítulo se define el fenómeno de las infiltraciones de aire y las distintas unidades utilizadas a nivel mundial. Finalmente se presenta un extracto de los valores límite exigibles en algunos países.

El cuarto capítulo presenta una breve caracterización del parque de viviendas construido el año 2011 en Concepción, la que se utilizará como universo para la definición de muestras y selección de los casos de estudio.

En el capítulo 5 se describe la línea base de la hermeticidad al aire de las viviendas en Chile, los valores medidos mediante ensayo y se presenta la metodología estadística utilizada para definir grupos de diferenciación respecto de la hermeticidad al aire.

El capítulo 6 presenta sets de simulaciones realizados para determinar la demanda energética de una muestra representativa de las viviendas construidas el año 2011 considerando los valores de hermeticidad al aire recogidos por la línea base.

El capítulo 7 presenta dos casos de estudio, el primero es una vivienda de albañilería de ladrillo con segundo piso en madera, el segundo es una vivienda de entramado de madera. Los casos de estudio son simulados considerando la hermeticidad al aire medida in situ para conocer la demanda energética teórica de cada uno. Después se simulan escenarios de mejora que combinan la disminución de la permeabilidad al aire con mejoras a la aislación térmica.

El capítulo 8 presenta las conclusiones generales del estudio y propone las futuras líneas de investigación que se vislumbran a propósito de la realización de este trabajo.

Capítulo 2 Introducción a la eficiencia energética y su relación con la hermeticidad al aire de las edificaciones

2.1 Eficiencia energética en Chile

La eficiencia energética es un tema muy presente en el desarrollo del país. El alto costo de la energía y la dependencia energética de otros países (Sohr, 2012) hace que sea de gran relevancia. El 26 % de la energía primaria utilizada en el país se destina al sector edificación (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Ministerio de Obras Públicas, & Ministerio de Energía, 2013), de esta fracción, un 30 %, aproximadamente, se destina al acondicionamiento térmico con un rendimiento y condiciones de confort desconocido, lo que permite reconocer un potencial de ahorro nacional al invertir en la eficiencia energética de las construcciones habitacionales. De acuerdo con el Programa de Estudios y Energía de la Universidad de Chile (PRIEN) en el año 2008, el sector de edificación representa el 18 % del total nacional del potencial de eficiencia energética al año 2020, sólo superado por el sector Industrial y Minero.

Se espera que estas cifras vayan en aumento, ya que se puede constatar que los niveles de confort al interior de las viviendas no son los óptimos². Esto, combinado con una economía creciente, nos hace pensar que el consumo de energía para el acondicionamiento térmico de los edificios va en aumento, considerando el calentamiento en invierno y enfriamiento en verano. Este panorama hace indispensable aumentar la calidad con la que se construyen las viviendas en el país para optimizar el rendimiento de la energía utilizada.

Es sabido que las demandas de calefacción o enfriamiento en edificios están definidas por varios factores como transmisión, ventilación, infiltración, ganancias solares y aportes internos, los que combinados determinan la demanda energética. El otro factor que influye en la demanda es el clima de la localidad en que se emplaza. En el país se pueden reconocer

²En la zona centro-sur del país los valores promedio de temperatura interior en invierno, en las viviendas estudiadas, se encuentran entre los 16 y los 18 °C, de acuerdo con (Álvarado & González, 2014)

fácilmente diferencias climáticas al cambiar la latitud de las ciudades, al mismo tiempo, el clima está determinado por la altura y la cercanía al mar, lo que permite que Chile tenga una gran cantidad de climas, a los que debe adaptarse el construir.

Al entender el problema de la eficiencia energética desde un punto de vista sistémico se posibilita conocer y regular la incidencia de los factores que la determinan y así poder aproximarse a niveles de cumplimiento alternativos.

Las infiltraciones de aire se definen como el movimiento de aire sin control a través de grietas ocultas y aberturas no previstas en la envolvente y supone fugas de calor durante el periodo de calefacción e ingreso de calor durante el período de verano. Este fenómeno depende de la calidad de la envolvente y de condicionantes climáticas.

La calidad de la envolvente se refiere a los materiales que la conforman, la calidad de la ejecución de la envolvente térmica y el deterioro que se produce con el pasar del tiempo. Estudios realizados en el marco del proyecto FONDEF D10 I 1025 (Citec UBB & Decon UC, 2014) caracterizan la calidad de la envolvente con un valor promedio de permeabilidad al aire de 12,9 ach (cambios de aire hora) medidos a 50 Pa según la norma (UNE-EN 13829, 2002) en viviendas construidas después de la aplicación de la Reglamentación Térmica. Al no contar con información respecto de otras mediciones estadísticamente representativas en el país sólo se puede contrastar este valor con las exigencias europeas, las que son mucho más restrictivas, solicitando en general valores alrededor de los 3 (1/h @ 50 Pa) (Economidou, 2011). Obviamente este valor es un indicador muy general ya que la variabilidad de la muestra es considerable, pero habla de un problema que no ha sido considerado a nivel normativo ni al aplicar estrategias de mejoramiento energético. Asimismo hay que considerar que las infiltraciones son subvaloradas en los cálculos y simulaciones realizadas para estimar demandas energéticas, lo que afecta la calidad de las predicciones realizadas y la valides de las medidas tomadas en función de éstas.

Las condicionantes climáticas que afectan este fenómeno son temperatura, humedad relativa del aire y principalmente velocidad del viento. Estos factores hacen necesario un estudio acucioso debido a la diversidad climática que existe en el país (Citec UBB & Decon UC, 2012, Chapter 1). En el caso de Chile se ha realizado un estudio sobre 54 capitales provinciales (CITEC

UBB, 2012), aplicando la teoría desarrollada por Max Sherman (Sherman, abril 1986), conocida como grados día de infiltración, que considera la temperatura, velocidad del viento y humedad relativa del aire para definir la rigurosidad climática.

Ante la evidente necesidad de definir valores aceptables de infiltración para viviendas en Chile, esta definición debe considerar los variados climas presentes en el país, las materialidades predominantes en la construcción y los valores que se han podido identificar en el país.

Los ejemplos internacionales estudiados muestran que existen normas del tipo unizona y multizona, siendo el segundo tipo aplicable al país, considerando la variable climática. Al adoptar dicho modelo es necesario definir valores límite para la infiltración. La definición de estos valores debe considerar la realidad de la construcción en Chile, ya que no se puede establecer exigencias que en la práctica no será posible cumplir (Heijmans, Wouters, & Heiselberg, 2008).

Al igual que el fenómeno de la transmisión de calor, las infiltraciones de aire pueden ser separadas en una parte independiente del clima (La hermeticidad de la envolvente del edificio) y otra impulsada por un término dependiente del clima (viento y diferencia de temperatura). De manera distinta a las cargas térmicas por transmisión, las cargas por infiltración no son lineales (es decir que la carga no es simplemente proporcional a la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior) y dependen de la velocidad del viento además de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior (M. Sherman, 1986b, p. 4).

La evaluación experimental de una muestra representativa de la vivienda en Chile, demostró que los niveles de infiltración están directamente relacionados con la materialidad de la envolvente. Se pudo comprobar empíricamente que las envolventes consideradas homogéneas tienen niveles de infiltración muy inferiores a las envolventes heterogéneas. Esto quiere decir que las viviendas construidas con envolventes de hormigón y albañilería de ladrillo tienen un camino más fácil para cumplir con los niveles de hermeticidad al aire requeridos, comparadas con, por ejemplo, los entramados de madera.

2.1.1 Eficiencia energética en la vivienda en Chile

El clima debe condicionar la propuesta arquitectónica de las edificaciones, ya que se trata del factor externo que mayor impacto tiene sobre la calidad ambiental al interior de los edificios y su demanda energética durante la vida útil. Es necesario considerar, al concebir un edificio, cinco factores climáticos: temperatura, humedad ambiente, precipitación, viento y radiación solar (Citec UBB & Decon UC, 2012, Chapter 1). Desde este punto de vista, Chile presenta condiciones únicas; el país se extiende entre los 17° 30' Sur y el Polo Sur, contando con territorio en zonas templadas, con una parte en la zona intertropical y también en zonas polares del hemisferio sur.

Según la clasificación climática de Köppen, Chile incluye dentro de su territorio al menos a siete de los grandes subtipos climáticos: Clima desértico en regiones del norte; clima mediterráneo en regiones de Chile central; clima oceánico en el sur; tundra y glaciares en regiones del sur del país; húmedo subtropical en Isla de Pascua y clima polar en el territorio antártico.

Todo esto hace imposible aplicar iguales valores normativos para todo el territorio y obliga a diversificar las estrategias de diseño según la ubicación climática del emplazamiento.

Ante esta situación aparecen varias interrogantes respecto de la demanda energética de las edificaciones:

¿Es correcto que los habitantes del extremo sur deban invertir mucho más dinero en acondicionar sus hogares?

¿Es necesario que el gobierno aplique subsidios diferenciados por zonas?

¿Es necesario definir normativas que busquen unificar la demanda energética de los edificios, pidiendo mayor aislación térmica en las zonas extremas y alivianando las exigencias conforme se acerca al centro y norte del país?

Para mejorar la calidad ambiental y disminuir la demanda energética de las viviendas se han propuesto en el medio nacional normativas, leyes y sugerencias de diseño, que se explican en el siguiente punto.

2.1.2 Estándares energéticos, reglamentación y certificaciones energéticas en Chile

Las políticas públicas en este sentido se resumen en la entrada en vigencia de la reglamentación Térmica en los años 2000 y 2007 (Instituto de la Construcción, 2006), que considera aislación térmica de cubierta y envolvente compuesta por muros, ventanas y pisos ventilados, respectivamente. Esta normativa fue desarrollada con el fin de limitar las demandas por transmisión de energía entre el interior de los recintos y el ambiente exterior y se encuentra en el punto 4.10.1 de la OGUC³ (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2014b).

Para impulsar el diseño y construcción sustentable en el país se firmó el año 2012 el Convenio Interministerial de Construcción Sustentable⁴ que se define como: “Un modo de concebir el diseño arquitectónico y urbanístico, que se refiere a la incorporación del concepto de sustentabilidad en el proceso de planificación, diseño, construcción y operación de las edificaciones y su entorno, que busca optimizar los recursos naturales y los sistemas de edificación, de tal modo que minimicen el impacto sobre el medio ambiente y la salud de las personas” (Ministerio de Vivienda y Urbanismo et al., 2013). Este convenio permitió la elaboración de una Estrategia Nacional de Construcción Sustentable, que establece los lineamientos para integrar el concepto de desarrollo sustentable en el área de la construcción y que busca articular y vincular los planes energéticos y ambientales desarrollados por distintos organismos gubernamentales.

Cabe destacar que la estrategia Nacional de Energía, que forma parte de este mismo convenio interministerial, establece como meta una reducción del 12 % de la demanda energética proyectada para el año 2020 en Chile.

³ Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (D.S. N°47) es el reglamento de la Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC), y regula los procedimientos administrativo, de planificación urbana, de urbanización, de construcción, y los estándares técnicos de diseño y de construcción exigibles.

⁴ El Convenio Interministerial de Construcción Sustentable está integrado por el Ministerio de Obras Públicas, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, el Ministerio de Energía y el Ministerio de Medioambiente

Para dar respuesta a dichos objetivos se elaboró el Código de Construcción Sustentable para Viviendas en Chile (Building Research Establishment, 2014), el que busca servir de guía para mejorar el desempeño ambiental de las viviendas definiendo criterios verificables.

El Código de Construcción Sustentable para Viviendas se centra en cuatro categorías: Energía; Agua; Residuos; Salud y bienestar y considera una categoría adicional, donde se agrupan otros temas.

En el punto de energía se solicitan los valores límite de transmitancia térmica y hermeticidad al aire que se presentan en Tabla 1.

Dentro de este código se hace mención a la calificación energética de viviendas, sistema desarrollado por el Ministerio de Vivienda junto con el Ministerio de Energía. Esta calificación es de momento voluntaria y permite evaluar la demanda energética de una vivienda nueva, comparándola con una vivienda de referencia que se caracteriza por sólo cumplir con los estándares normativos. La calificación entrega una etiqueta similar a las utilizadas para evaluar la eficiencia energética de los electrodomésticos. La información se visualiza mediante colores y letras desde la A a la G, donde la vivienda de referencia que representa el estándar establecido por el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2014b) es calificada con la letra E.

La calificación define dos etapas de valoración, una en diseño, es decir antes de su construcción y otra en que se evalúan las viviendas ya construidas.

Hasta el momento existen 81 calificadores energéticos en el país y se han calificado viviendas del sector público y privado.

A fines del año 2013 el ministerio de Vivienda y Urbanismo, junto con una mesa técnica, elaboró una propuesta de Norma técnica (NTM 011), dividida en tres partes: Acondicionamiento acústico, Comportamiento higrotérmico, Calidad del aire interior, las que al momento de elaboración de este estudio se encuentran en revisión.

Esta nueva normativa propone además modificar la zonificación térmica existente, proponiendo 9 zonas que reconocen diferencias entre localidades ubicadas en la costa y centro

del país (Tabla 1), en un esquema similar al propuesto por la zonificación climática incluida en la NCh1079 Of.2008(Instituto Nacional de Normalización, 2008).

Tabla 1: Zonificación térmica según NTM 011, 2014 en revisión.

ZONA	LÍMITES GEOGRÁFICOS
Zona A (costera)	Se extiende por el norte desde la comuna de Arica hasta la comuna de Freirina por el sur, incluida ésta y las islas presentes en esta zona. Está limitada por el océano Pacífico al oeste y el meridiano 70° y límites comunales (zona térmica B) al este.
Zona B (interior)	Se extiende por el norte desde la comuna de Arica hasta las comunas de Illapel y Salamanca por el sur, incluidas éstas. Está limitada por las zonas térmicas A y C por el oeste y por la zona térmica G al este.
Zona C (costera)	Se extiende por el norte desde la comuna de La Higuera hasta la comuna de Paredones por el sur, incluida ésta y las islas presentes en esta zona. Está limitada por el océano Pacífico al oeste y las zonas térmicas B y D al este.
Zona D (interior)	Se extiende por el norte desde la comuna de Petorca hasta la comuna de Parral por el sur, incluida ésta. Está limitada por las zonas térmicas C y E al oeste y por la zona térmica G al este.
Zona E (costera)	Se extiende por el norte desde la comuna de Curepto hasta la comuna de La Unión por el sur, incluida ésta y las islas presentes en esta zona. Está limitada por el océano Pacífico al oeste y por las zonas térmicas D y F al este.
Zona F (interior)	Se extiende por el norte desde la comuna de Ñiquén y San Fabián hasta Río Bueno por el sur, incluida ésta. Está limitada por la zona térmica E por el oeste y por las zonas térmicas G y Argentina al este.
Zona G (cordillera de Los Andes)	Se extiende por el norte desde la comuna de Arica y General Lagos hasta la comuna de Pucón y Curarrehue por el sur, ambas incluidas. Está limitada por las zonas térmicas B, D y F al oeste y Argentina al este.
Zona H (sur)	Se extiende por el norte desde las comunas de Puyehue, San Pablo y San Juan de la Costa hasta las comunas de Quellón y Chaitén por el sur, ambas incluidas y las islas presentes en esta zona. Está limitada por el océano Pacífico al oeste y Argentina al este.
Zona I (extremo sur)	Se extiende por el norte desde las comunas de Guaitecas, Cisnes y Palena hasta el territorio antártico chileno por el sur, incluido éste y las islas presentes en ésta.

(Fuente: Elaboración propia con datos de MINVU, 2014b)

El documento Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento ambiental de las edificaciones. Parte 2: Comportamiento higrotérmico, se refiere a “las características y condiciones de diseño y ejecución que deben tener los elementos que conforman las edificaciones, independiente de su uso, para cumplir con el objetivo de otorgar confort higrotérmico a los usuarios de éstas” (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2014c, p. 4).

Sugiriendo niveles de aislación térmica mínimos para complejos de techumbre, muros y pisos coincidentes con los sugeridos por el Código de Construcción Sustentable para Viviendas, y además incluye valores de transmitancia térmica máxima para puertas como se detalla en Tabla 2. Todas estas recomendaciones se aplican según la zona térmica a la que pertenece cada localidad, información disponible en formato de mapa en los anexos de dicha norma.

Tabla 2: Transmitancia térmica máxima para complejo de techumbre, muro, piso ventilado y puerta, y resistencia térmica mínima para materiales de aislación en pisos en contacto con el terreno en edificaciones de uso residencial, educación y salud.

	Aislación térmica de techos	Aislación térmica de muros	Aislación térmica de pisos ventilados	Aislación térmica de pisos sobre el terreno	Aislación térmica de ventanas	Complejo de puerta
	Valor U (W/m ² K)	Valor U (W/m ² K)	Valor U (W/m ² K)	R100 [(m ² K)/W]*100	Valor U (W/m ² K)	Valor U (W/m ² K)
A	0,84	2,10	3,60	--	5,8	-
B	0,47	0,50	0,70	45	3,6	1,0
C	0,47	0,80	0,87	45	3,6	1,2
D	0,38	0,60	0,70	45	3,6	1,2
E	0,33	0,50	0,60	45	3,0	1,0
F	0,28	0,45	0,50	91	3,0	1,0
G	0,25	0,30	0,32	91	2,4	1,0
H	0,28	0,40	0,39	91	3,0	0,8
I	0,25	0,30	0,32	91	3,0	0,8

(Fuente: Elaboración propia con datos de MINVU, 2014b)

El proyecto de norma también se refiera a los puentes térmicos en la envolvente térmica, exigiéndoles, al menos, cumplir con los requerimientos normativos para evitar riesgos de condensación superficial y formación de moho.

Los elementos vidriados de la envolvente deberán cumplir con los porcentajes máximos de superficie como se presentan en Tabla 3 de acuerdo con la transmitancia térmica del vidrio y su orientación.

Tabla 3: Porcentaje máximo de superficie de complejo de ventanas por orientación en edificaciones de uso residencial

Zona Térmica	U>3,6 W/(m ² K)				3,6 ≥ U >2,4 W/(m ² K)				U ≤2,6 W/(m ² K)			
	N	S	E-O	Pond.	N	S	E-O	Pond.	N	S	E-O	Pond.
A	70%	45%	60%	30%	90%	65%	80%	40%	100%	100%	100%	-
B	70%	10%	25%	12%	85%	40%	65%	32%	95%	60%	85%	40%
C	40%	15%	35%	15%	80%	50%	60%	30%	95%	65%	85%	40%
D	25%	10%	15%	10%	70%	30%	60%	27%	90%	50%	80%	37%
E	0%	0%	0%	-	70%	25%	55%	25%	90%	45%	80%	37%
F	0%	0%	0%	-	60%	20%	37%	20%	85%	40%	75%	35%
G	0%	0%	0%	-	35%	10%	20%	10%	65%	20%	35%	20%
H	0%	0%	0%	-	55%	15%	30%	15%	75%	25%	60%	27%
I	0%	0%	0%	-	35%	10%	20%	10%	65%	20%	35%	20%

(Fuente: MINVU, 2014b)

Al mismo tiempo los complejos de ventana de edificaciones de uso residencial, educacional y salud, deberán cumplir con los factores solares modificados máximos por orientación señalados en la norma, para prevenir el sobrecalentamiento por ganancias térmicas.

La acreditación del cumplimiento de los requerimientos de la norma puede ser realizada adjuntando una memoria de cálculo, mediante ensayos o utilizando soluciones inscritas en el Listado Oficial de Soluciones Constructivas del MINVU (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2014a).

La parte 3, “Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento ambiental de las edificaciones. Parte 3: Calidad del aire interior” (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2014d), se refiere a la hermeticidad al aire, proponiendo valores de hermeticidad al aire máximos por zona térmica, como se presenta en Tabla 4.

Tabla 4: Clase de infiltración de aire máxima permitida para la envolvente térmica de las edificaciones de uso residencial, educación y salud, excluyendo de ésta los complejos de puerta y ventana.

Zona Térmica	Clase de Infiltración de aire 1/h @50 Pa
A	-
B	6,00
C	9,00
D	8,00
E	8,00
F	7,00
G	4,00
H	6,00
I	4,00

(Fuente: MINVU, 2014c)

Los valores que se presentan fueron determinados basándose en los resultados del proyecto FONDEF D10 I 1025 y sus resultados contenidos en el Manual de Hermeticidad al Aire de edificaciones (Citec UBB & Decon UC, 2014) y adecuados a la zonificación térmica propuesta por la normativa. Cabe mencionar que la observación enviada por CITEC UBB a esta norma fue acogida por la DITEC MINVU⁵, que modificará la propuesta de zonificación para la hermeticidad al aire, proponiendo valores límite por provincia. Esta modificación reconoce la influencia de la velocidad del viento sobre las infiltraciones y que existen grandes diferencias al respecto en zonas que desde el punto de vista de la temperatura del aire, son muy similares.

Además, esta norma exige estándares de permeabilidad al aire máximos para los complejos de puertas y ventanas, asegurando la calidad hermética de estos componentes de la construcción, siempre asociando los estándares requeridos a la zonificación térmica como se muestra en Tabla 5.

⁵ División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional del Ministerio de Vivienda y Urbanismo

Tabla 5: Grado de estanquidad al aire mínima para complejos de puerta y ventana de las edificaciones de uso residencial, educación y salud. Según NCh888 Of.2000.

Zona Térmica	Grado de estanquidad a 100 Pa ($m^3/h/m^2$)
A	-
B	30a 10a 7a
C	30a 10a 7a
D	10a 7a
E	10a 7a
F	10a 7a
G	7a
H	7a
I	7a

(Fuente: MINVU, 2014c)

La clasificación que se presenta en Tabla 5 se realiza tomando los resultados del ensayo de estanquidad al aire según norma NCh892 Of.2001. El ensayo se realiza en laboratorio, ubicando un elemento de ventana de tamaño natural y elegido de un lote al azar en un banco de prueba o cámara estanca, y someterlo a una escala de presiones diferenciales controladas, durante un periodo determinado. Los resultados del ensayo se expresan por superficie expuesta de ventana ($m^3/h m^2$) y por metro lineal de junta ($m^3/h m$), medidos a un diferencial de presión de 100 Pa, de acuerdo a NCh888 Of.2000.

Tabla 6: Clases de permeabilidad al aire de ventanas.

Tipo	Caudal máximo de aire por superficie de hoja ($m^3/h m^2$)	Caudal máximo de aire por metro lineal de junta ($m^3/h m$)
60a (mínimo)	60	≤ 12
30a (normal)	30	≤ 6
10a (especial)	10	≤ 2
7a(especial)	7	$\leq 1,4$

(Fuente: NCh888 Of.2000)

Respecto de la ventilación la NTM 011/3 exige que las edificaciones de uso residencial, educación y salud, cuenten con un sistema de ventilación mecánico que garantice la calidad aceptable del aire interior de los recintos.

Todos los recintos habitables deberán tener como mínimo una ventana que permita la entrada de aire y luz del exterior, con una distancia mínima libre horizontal de 1,5 m medida en forma perpendicular a la ventana cuando se trate de dormitorios. Admitiéndose ventanas fijas en caso de contar con un sistema de ventilación mecánico conectado a un generador automático, a menos de que se trate de un dormitorio o un recinto donde se encuentre algún tipo de artefacto de combustión.

Esta normativa, aunque válida, se refiere a una parte del complejo problema de la eficiencia energética en edificación y aunque dicho acercamiento al tema es muy importante, es al mismo tiempo insuficiente, ya que se estima internacionalmente que las infiltraciones de aire pueden representar un 50 % de la demanda energética de una edificación (Dorer, Tanner, & Weber, 2004), porcentaje que se estima, según la hipótesis de esta tesis, muy por encima de la influencia de la calidad térmica de la envolvente en el estado actual de la construcción de la ciudad de Concepción.

2.2 Demanda energética

La demanda energética se entiende como la cantidad de energía necesaria para lograr temperaturas de confort al interior de las edificaciones. La demanda de una vivienda está compuesta por demandas de calefacción, refrigeración, iluminación, ventilación (intercambio de aire a temperatura de confort por aire frío/caliente exterior para asegurar la calidad del aire), infiltraciones de aire, equipos y agua caliente sanitaria en distintas proporciones dependiendo del diseño de la vivienda, la orientación, la localización geográfica, microclima (isla de calor, cañones urbanos, etc.) y de los patrones de ocupación.



Figura 2: a) Diagrama Sankey representando el balance energético en régimen de calefacción de una edificación tipo. b) representación esquemática de ganancias y pérdidas a través de la envolvente. (Fuente: Citec UBB & Decon UC, 2014)

Como se puede observar en Figura 2, la demanda energética se relaciona con las ganancias solares desde el exterior por ventanas y ganancias internas derivadas de los ocupantes y los equipos contenidos en el edificio. Las pérdidas se producen por ventilación, transmisión e infiltraciones de aire. Las pérdidas por el rendimiento de los equipos de climatización se encuentran, se relacionan con el consumo energético, que se define simplificadaamente como la demanda energética dividida por el rendimiento del equipo.

La demanda energética se ha utilizado internacionalmente como medida de la calidad energética de las edificaciones, aunque para conocer el real impacto de las demandas sobre la economía familiar y a nivel país es necesario considerar el consumo energético, que incluye factores como tipo de combustible, rendimiento de equipos y uso de éstos.

2.2.1 Demanda energética de las viviendas en Chile

Conocer la demanda energética de las viviendas en el país es indispensable para evaluar el impacto de las normativas existentes y proponer estrategias de uso eficiente de la energía para implementar en el futuro.

La revisión que aquí se presenta se centra en la región del Biobío, más específicamente en la ciudad de Concepción, y busca sintetizar valores de demanda energética presentados por las múltiples investigaciones realizadas a la fecha en el ámbito de la construcción sustentable de viviendas. Para esto se consultan trabajos, en su mayoría basados en simulaciones, buscando antecedentes, de ser posible, sobre la consideración de las infiltraciones de aire en el cálculo de la demanda.

Bustamante, en el 2004, presentó un estudio (Bustamante, 2004) con el objetivo de proponer una metodología para la zonificación de Chile asociada a estrategias de diseño para el confort interior y un uso eficiente de la energía.

Este estudio presenta una metodología que considera simulaciones térmicas en régimen dinámico tipo multizona utilizando el software MBDS, originalmente desarrollado por la Universidad de Liège (Bélgica), al que se le modificó el algoritmo de cálculo para incluir los modelos de Skartveit y Olseth y de Perez para el cálculo de radiación directa y difusa en planos inclinados.

Para las simulaciones se eligieron tres tipologías de agrupamiento para viviendas; un piso aislada, dos pisos aislada y dos pisos pareadas y tres para edificios. La superficie de los casos de estudio se encuentra entre los 35 y los 130 m². La materialidad de muros fue definida como albañilería de ladrillos huecos para viviendas y hormigón armado para edificios. La aislación térmica considera la normativa anterior al 2007, es decir aislación de techumbre. Las ventanas se consideran de aluminio con vidrio simple. Los rangos de confort son diferenciados por recinto; estar-comedor, dormitorios, baños y por horarios de día y noche. En general las temperaturas de confort definidas se encuentran entre 15 °C y 22 °C. Los resultados de las simulaciones para Concepción se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7: Demanda energética de calefacción en viviendas.

Materialidad muros	Alb. Ladrillo hueco 140 mm sin estuco		Hormigón armado 200 mm	
Aislación térmica en cielo (mm)	100	100	100	100
Aislación térmica en muros(mm)	--	20	--	20
Tipología de vivienda	Demanda energética de calefacción (kWh/m ² año)			
Casa 60 m ² pareada 1 piso	123,5	61,1	--	--
Casa 85 m ² aislada 1 piso	161,4	79,9	--	--
Casa 130 m ² aislada 2 pisos	154,1	75,3	--	--
Departamento 60m ²	124,3	54,3	--	--
Departamento 85m ²	115,6	45,0	146,1	49,8
Departamento 130m ²	116,5	50,3		

(Fuente: Bustamante, 2004)

Se destaca que en este estudio se considera como regla general un valor de renovaciones de aire de 1,0 (1/h). Asimismo se recomienda, en este artículo, que las renovaciones de aire sean lo más controladas posibles, pero sin dar valores referenciales. Tampoco se distingue entre renovaciones por infiltración y/o ventilación, asumiéndose que los 1 (1/h) de renovación utilizados para calcular la demanda se refieren tanto a ventilación como a infiltraciones.

El año 2008, Fissore y otros presentaron el estudio de línea base para el sistema de certificación energética de viviendas, informe elaborado para el desarrollo de una herramienta de calificación energética de viviendas en Chile.

En dicho informe se presenta el análisis de demanda y consumo energético de cuatro tipologías de viviendas, que representan una parte importante de las viviendas construidas entre los años 1994 y 1998. Para el estudio se consideran dos tramos de edad, viviendas construidas antes de la entrada en vigencia de la primera parte de la reglamentación térmica y considerando la primera parte de la reglamentación térmica.

El estudio de la demanda energética se realiza con el programa de cálculo CCTE_CL y se confirma mediante el cálculo de los grados día en base fija. Para este estudio se definen 8 tipologías representativas, sobre las que se realizan las simulaciones. En la Tabla 8 se presentan los valores de demanda energética para la ciudad de Concepción, que fue elegida como representativa de la zona 4. El período de simulación utilizado fue todo el año considerando los

meses de calefacción y refrigeración según lo indicado en (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2002) para cada zona térmica.

Tabla 8: Tipologías de vivienda y demanda energética asociada a envoltante que cumple con la RT en la ciudad de Concepción.

	Demanda energética de calefacción (kW/h m² año)	Demanda energética de enfriamiento (kW/h m² año)
Casa pareada de un piso de ladrillo de 31 m² construidos y 4.4 m² de ventana	119	3
Casa aislada de un piso de madera de 38 m² construidos y 10.4 m² de ventana. Montada sobre pilotes	135	49
Departamento de ladrillo de 39 m² construidos y 5.7 m² de ventana	78	30
Casa aislada de un piso de ladrillo de 66 m² construidos y 10.6 m² de ventana.	119	0
Departamento de Hormigón de 67 m² construidos y 12.7 m² de ventana.	77	10
Casa pareada de 2 pisos mixta (ladrillo – madera) de 43 m² construidos	115	32
Departamento de Hormigón de 61 m² construidos y 13.4 m² de ventana.	66	42
Casa aislada de 2 pisos mixta (ladrillo – madera) de 112 m² construidos y 25.4 m² de ventana	118	22

(Elaboración propia en base a Fissore & Colonelli Pérez-Cotapos, 2008)

El documento antes citado considera para el cálculo de la demanda energética un valor de infiltración de un cambio de aire por hora, para todo el territorio nacional.

Bustamante, en el 2009 elabora junto a otros la “Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social”. Documento de consulta, ampliamente citado, donde también se sugieren valores de demanda energética de viviendas, en este caso sociales (Bustamante, Rozas, Cepeda, Encinas, & Martínez, 2009). Los resultados de las simulaciones de demanda de calefacción realizadas con el software Tas, se presentan en Tabla 9.

Tabla 9: Demanda energética de viviendas sociales según Bustamante, 2009

	Vivienda social 38 m ²	Vivienda social 41 m ²
Numero de pisos	1	2
Agrupamiento	pareada	pareada
Orientación	norte	norte
Valor U muros (W/m² K)	1,7	1,7
Valor U cielo (W/m² K)	0,47	0,47
Valor U ventanas (W/m² K)	5,8	5,8
Superficie vidriada	9%	10%
Demanda de calefacción (kW/h m² año)	115	97

(Elaboración propia en base a Bustamante, Rozas, et al., 2009)

En el mismo documento se estima que el consumo promedio estimado de energía para calefacción de viviendas sociales en Chile se encuentra entre los 30 y 200 kW/h m² año.

El mismo año, pero en otra publicación, Bustamante realiza una revisión crítica de las políticas públicas vigentes respecto de la limitación de la demanda energética, desde la mirada de la vivienda social (Bustamante, Cepeda, Martínez, & Santa María, 2009). En dicho documento hace mención al desconocimiento que existe en el país de las características herméticas de la envolvente, y menciona que los estudios realizados por Fissore en el 2008, mencionados en párrafos anteriores, consideraron 1 cambio de aire hora al igual que la herramienta de cálculo CCTE_CL. Se explica en el documento que en base a evaluaciones realizadas por CITEC UBB, se puede “concluir que la demanda de energía de calefacción está fuertemente afectada por las infiltraciones de aire, alcanzando una participación que varía entre un 24 y 73 % del consumo total de energía por calefacción”(Bustamante, Cepeda, et al., 2009, p. 267).

El efecto de las infiltraciones de aire, explica, podría anular totalmente el esfuerzo de mejorar térmicamente el muro al disminuir su transmitancia térmica de 1,7 W/m² °C a 0,6 W/m² °C en la ciudad de Concepción, ya que con una tasa de intercambio de aire de 2,0 (1/h) en la vivienda térmicamente mejorada, se alcanza una demanda de energía de calefacción levemente inferior a la de esta misma vivienda, con un envolvente que cumple los estándares mínimos de la RT.

En otra publicación, esta vez asociada a la reconstrucción pos terremoto, Celis y otros (Celis, Díaz, et al., 2012), presentan un análisis teórico de demanda energética de una vivienda de 90 m² en dos niveles; el primero en albañilería de ladrillo y el segundo materializado en entramado de madera, ubicada en Concepción. El cielo de las viviendas cumple con la normativa vigente. La orientación de la vivienda es norte-sur con una relación vano-fachada de 30 % al norte y 20 % al sur. Los resultados de simulaciones se resumen en Tabla 10.

Tabla 10: Demanda energética de viviendas según Celis, 2012

	Vivienda según norma	Vivienda mejorada	Vivienda mejorada con masa térmica	Vanos optimizados
Valor U muros (W/m ² K)	1,7	0,8	0,8	0,8
Valor U ventanas (W/m ² K)	5,8	3,0	3,0	3,0
vanos norte	30%	30%	30%	--
vanos sur	20%	20%	20%	10%
Masa térmica (mm)	--	--	100	100

	Demanda energética según agrupamiento (kW/h m ² año)			
aislada	143	87	71	54
pareada	111	71	55	42
continua	81	55	38	29

(Fuente: Elaboración propia en base a Celis et al., 2012)

Este estudio se centra en la influencia del agrupamiento en la demanda energética, además de analizar distintos escenarios de aislación térmica de muros. En la publicación no se hace mención a las condiciones de simulación, pero como autora, sé que al momento de realizar las simulaciones no se tenía conocimiento de las condiciones de hermeticidad al aire de las edificaciones en Chile, por lo que se utilizó un valor base de 1 cambio de aire hora por infiltración.

Bobadilla (2014, Chapter 3) presenta en su tesis doctoral un diagnóstico de la calidad energética de la construcción actual en Chile y niveles de demanda energética óptimos para el parque de viviendas en las distintas provincias de Chile. El diagnóstico de calidad se basa en el trabajo realizado por el Proyecto FONDEF D10 I 1025, del cual se extractan los valores para Concepción en el Capítulo 6: Demanda energética de viviendas tipo para la ciudad de Concepción.

Los niveles de demanda energéticos óptimos propuestos por Bobadilla para la ciudad de Concepción son de (111 kWh/m² año), presentando una brecha de (81 kWh/m² año) respecto del construir actual.

2.3 Conclusiones

Del estudio del estado del arte de la eficiencia energética en vivienda en Chile se puede concluir, a modo general, que existen numerosos intentos de mejorar la eficiencia del uso de la energía. De estos esfuerzos, gran parte se encuentra en los organismos públicos que hacen eco de los problemas de escasez energética en el país. La investigación que sustenta las mejoras para la eficiencia en el uso de la energía en la edificación en Chile se concentra en los núcleos universitarios tradicionales. Y existe comunicación y concordancia entre las propuestas ministeriales y la investigación actual.

Respecto de los estándares de calidad de la envolvente de vivienda, se observa que en la actualidad sólo se ha normado la transmisión de calor por la envolvente opaca (muros, techo, pisos ventilados) y transparente (ventanas) basado en una zonificación térmica del país. Las normativas en estudio impulsadas por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo reconocen la investigación realizada de la hermeticidad al aire de viviendas y propone limitaciones al respecto.

Los estudios de la demanda energética de vivienda, primeramente, no permiten la comparación entre valores, debido a las diferencias en las condiciones de borde utilizadas, por ejemplo rangos de confort y cantidad de días de calefacción. Respecto de las infiltraciones, éstas han sido consideradas como un cambio de aire hora fijo, para todo el país y todo el año, factor que no considera la hermeticidad de la envolvente ni las condiciones climáticas de velocidad del viento y temperatura. Esta simplificación de cálculo puede llevar a diferencias sustanciales entre los valores calculados por software y la demanda real de las viviendas.

Los valores de demanda energética de las viviendas simuladas fluctúan entre 61,1 y 161,4 (kW/h m² año), siendo siempre mayor en el caso de viviendas aisladas, con un mínimo de 119 (kW/h m² año), pero siempre considerando que las metodologías utilizadas para el cálculo de demanda difieren entre sí.

Respecto de las infiltraciones de aire, en ninguno de estos casos se presentan datos que consideren los valores de hermeticidad al aire de las viviendas y su consiguiente influencia en las infiltraciones de aire. Como explica Bustamante, no considerar las infiltraciones de aire en el

cálculo de la demanda energética de una vivienda puede llevar a errores de apreciación de hasta un 73 % o considerando propuestas más moderadas realizadas en el ámbito internacional hasta un 50 %.

Se advierte en general un desconocimiento sobre el impacto de las infiltraciones de aire sobre la demanda energética de viviendas.

Desarrollo de la investigación

Capítulo 3 Las Infiltraciones de aire

“Las infiltraciones de aire, se definen como el paso de aire sin control a través de grietas ocultas y aberturas no previstas en la envolvente. Generan cargas térmicas, de frío o calor según la temporada, que inciden en el desempeño energético del edificio y, además, sirven de transporte de ruidos y contaminantes atmosféricos, que afectan el confort ambiental” (Citec UBB & Decon UC, 2014, p. 22).

Las consecuencias sobre la demanda energética de las infiltraciones están relacionadas con la entrada de aire no acondicionado a espacios acondicionados, lo que produce un intercambio de aire no intencionado, que puede llegar a representar un 50 % de la demanda energética de una edificación (Dorer et al., 2004).

Las infiltraciones pueden afectar también la calidad de vida de los ocupantes por otros medios. Por ejemplo, el aire que pasa por una grieta en un muro desde el interior hacia el exterior va disminuyendo su temperatura al atravesar el muro, lo que disminuye la capacidad de contener vapor de agua del aire, produciéndose condensación al interior del muro. Las condensaciones provocan una disminución de la capacidad aislante de algunos materiales, daños producto de la humedad y la aparición de hongos al interior del muro o superficialmente.

En caso de que las infiltraciones sean mayores se producen problemas de confort térmico debido a la velocidad del aire. Velocidades sobre los 2 m/s al interior de los recintos son perceptibles por los ocupantes.

El transporte de ruidos molestos también está relacionado con la hermeticidad al aire y se vuelve crítico al enfrentarse a fuentes de ruido considerables, como pueden ser calles muy transitadas, tráfico aéreo, entre otras.

Hay que considerar también que el aire que ingresa a las viviendas puede contener contaminantes, ya sean de fuentes constantes como el tráfico vehicular en una avenida o puntuales como puede ser el humo producto de un incendio o escapes de gases tóxicos de alguna fuente cercana.

El término infiltraciones de aire se utiliza para referir dos fenómenos; las infiltraciones y exfiltraciones de aire, como lo sugiere su nombre, las primeras se refieren al aire que ingresa a un recinto (por ejemplo una vivienda) mientras que las segundas, al aire que es expulsado fuera del edificio. Considerando las leyes físicas de conservación de la masa, ambos fenómenos se deben presentar al mismo tiempo para que exista intercambio de aire, pero el término infiltración se utiliza para referirse al flujo de aire involuntario producido desde el exterior hacia el interior, debido a diferencias de presión, causadas por el viento y diferencial de temperatura entre el interior y exterior o efecto stack en edificios de mayor altura.

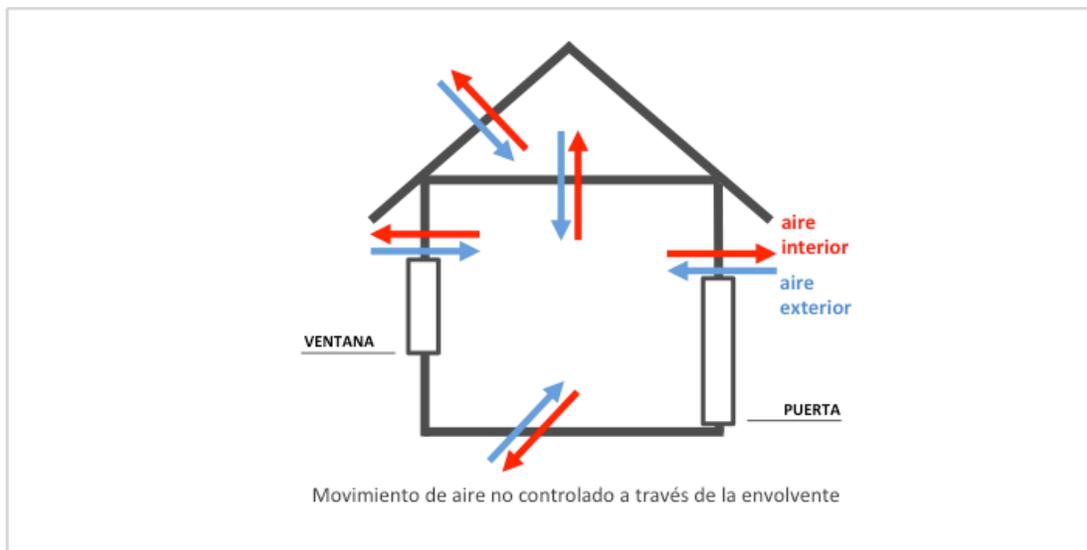


Figura 3: Infiltraciones y exfiltraciones de aire en una edificación. (Fuente: Elaboración propia)

El término exfiltración se utiliza para referirse a los flujos de aire involuntarios producidos por sobrepresiones al interior de los edificios. Este fenómeno se relaciona normalmente con edificios que cuentan con sistemas de climatización por inyección o enfriamiento de aire, donde se produce una diferencia de densidad entre el aire interior a menor temperatura (más denso) y el exterior (menos denso).

Las infiltraciones de aire dependen de dos factores principales, las condiciones climáticas de viento y temperatura y la calidad hermética de la envolvente.

3.1 Condiciones climáticas

Para evaluar las infiltraciones de aire, los factores climáticos que influyen, y por lo tanto es necesario conocer, son la velocidad del viento, la dirección del mismo y los diferenciales de temperatura que se presentan en el lugar en estudio.

Para el caso de Chile se definió, como parte del proyecto FONDEF D10 I 1025, una zonificación por grados día de infiltración (GDI) siguiendo la metodología propuesta por Sherman (M. Sherman, 1986a, 1986b) y utilizada para definir las zonas de infiltración en EE.UU. y Canadá, contenida en la norma ASHRAE 119-RA2004 (ASHRAE, 2004).

Para el cálculo numérico de los GDI se utiliza el modelo de infiltración LBL (M. H. Sherman & Modera, 1986), descrito en 3.5.2 Modelo LBL pág. 57, que permite caracterizar la calidad hermética de la envolvente, mientras que las condiciones climáticas se calculan de forma similar a los grados día de calefacción relacionados con la transmisión.

Para el cálculo de los grados día de infiltración, se contabilizan tanto los grados día de infiltración de calefacción (GDI_c) como los grados día de infiltración de refrigeración (GDI_r), según la siguiente ecuación:

$$GDI = GDI_c + GDI_r \quad \text{Eq. 1}$$

Donde:

GDI : grados día de infiltración totales

GDI_c : grados día de infiltración de la estación de calefacción

GDI_r : grados día de infiltración de la estación de refrigeración.

Los grados día de infiltración de calefacción se basan en la demanda de energía que provocarán las pérdidas térmicas causadas por infiltración a lo largo del año y, por lo tanto, se compilan para cada hora en la que la temperatura de bulbo seco está bajo la temperatura base de calefacción.

$$GDI_c = \frac{1}{24} \sum_{horas}^{T_{ext} < T_{base}^c} \frac{s}{s_o} (T_{base}^c - T_{ext}) \quad \text{Eq. 2}$$

Donde:

GDI_c : Grados día de infiltración (período de calefacción)

S : infiltración específica

S_o : infiltración específica típica

T_{base}^c : Temperatura interior base de calefacción

T_{ext} : Temperatura exterior

En forma similar, los grados día (GDI) para la estación de refrigeración se compilan para cada hora en que la temperatura de bulbo seco supera a la temperatura base de refrigeración, y la entalpía es mayor que la entalpía base:

$$GDI_r = \frac{1}{24 C_p} \sum_{\substack{H > H_{base} \\ T_{ext} > T_{base}^R}} \frac{s}{s_o} (H - H_{base}) \quad \text{Eq. 3}$$

Donde

C_p : capacidad de calor del aire

T_{base}^R : temperatura base de refrigeración

H : Entalpía horaria

H_{base} : entalpía base

El número total de grados día de infiltración proporciona una buena estimación de la intensidad energética del clima respecto de la infiltración. En el caso de Chile se decidió hacer una clasificación en base a rangos de acuerdo a la rigurosidad climática para efectos de las infiltraciones, la que se muestra en Tabla 11. En Tabla 12 se grafican los grados día de infiltración, asignándole a cada provincia el valor correspondiente a la capital provincial.

Tabla 11: Rangos de grados día para zonificación.

Zona	Rango de GDI	N° ciudades
zona 1	500	5
zona 2	501 – 1500	18
zona 3	1501 – 3000	19
zona 4	3000-4500	7
zona 5	<4500	5

(Fuente: Citec UBB & Decon UC, 2014)

Tabla 12: Zonificación por grados día de infiltración del territorio nacional

	Ciudad	Temperatura mínima promedio (°C)	Temperatura máxima promedio (°C)	Velocidad del viento m/s	GDI °C día/año
1	Arica	16,1	22,4	5,1	57
2	Putre	2,3	23	8,7	5337
3	Iquique	15,1	21,3	3,1	161
4	Pozo Almonte	2,3	23	8,5	4951
5	Tocopilla	15,1	21,3	3,1	138
6	Calama	2,3	23	8,7	5097
7	Antofagasta	13,7	20,1	5,1	942
8	Chañaral	13,7	20,1	5,7	362
9	Copiapó	9,3	23,9	5,1	842
10	Vallenar	11,2	17,5	2,0	750
11	La Serena	10,3	18,2	4,1	847
12	Ovalle	9,6	22,3	5,5	842
13	Illapel	9,6	22,3	2,2	1428
14	La Ligua	6,7	22,4	2,4	1736
15	Los Andes	6,8	25,1	5,5	1250
16	San Felipe	6,7	22,4	5,6	1675
17	Quillota	6,7	22,4	2,5	1335
18	Valparaíso	9,7	22,7	6,2	1078
19	San Antonio	11,2	17,5	5,6	1090
20	Hanga Roa	17,5	24,0	4,9	18
21	Quilpué	11,2	17,5	5,6	1053
22	Colina	6,7	22,4	2,7	1798
23	Santiago	6,7	22,4	3,6	1800
24	Puente Alto	6,7	22,4	3,6	1267
25	San Bernardo	6,7	22,4	3,6	1800
26	Melipilla	6,7	22,4	2,7	1800
27	Talagante	6,7	22,4	3,6	1800
28	Rancagua	7,1	21,4	3,1	1317
29	San Fernando	7,1	21,4	3,1	1328
30	Pichilemu	11,2	17,5	5,6	1048
31	Curicó	7,1	20,8	3,1	2115
32	Talca	7,2	21,7	3,1	1429
33	Linares	7,0	20,6	3,3	1646
34	Cauquenes	7,7	21,3	7,0	1433
35	Chillán	6,7	20,1	3,1	2675
36	Los Ángeles	6,7	20,1	2,4	1519
37	Concepción	7,7	17,7	6,7	2958
38	Lebu	7,7	17,7	7,0	2720
39	Angol	6,7	20,1	2,4	1522
40	Temuco	6,3	17,7	3,0	4332
41	Valdivia	5,9	16,9	1,0	1607
42	La Unión	5,9	16,9	0,5	1467
43	Osorno	5,4	16,6	3,3	2461
44	Puerto Montt	6,4	14,9	4,6	3094
45	Castro	6,7	20,1	3,8	1544
46	Futaleufú	6,4	14,9	5,1	3033
47	Coyhaique	8,1	12,4	5,1	3415
48	Puerto Aysén	6,0	12,8	3,1	2608
49	Chile Chico	4,2	15,3	9,8	4338
50	Cochrane	3,2	13	6,6	5215
51	Puerto Natales	2,8	9,7	2,8	3802
52	Punta Arenas	2,8	9,7	8,2	3953
53	Porvenir	2,8	9,7	2,8	3754
54	Puerto Williams	2,4	9,4	5,7	5392



Figura 4: Zonificación por grados día de infiltración (Fuente: Manual de Hermeticidad al aire de edificaciones)

(Fuente: Citec UBB & Decon UC, 2014)

Como se puede observar existe gran diversidad de valores de GDI en el país, siendo el clima más benigno (respecto de las infiltraciones) el de Hanga Roa y el más riguroso el de Puerto Williams.

Los GDI más bajos se asocian a localidades interiores, principalmente de la zona centro norte del país, con microclimas, algunas de ellas, compatibles con velocidades medias de viento bajo los 2,5 m/s y varios meses con denominación meteorológica calma (menos de 2,0 m/s). Localidades compatibles también, en algunos casos, con temperaturas medias exteriores relativamente altas, que minimizan los efectos de tiro térmico.

Los GDI medios y altos se asocian a localidades más bien costeras, principalmente de la zona centro sur, con velocidades medias anuales sobre los 2,5 m/s y/o temperaturas medias bajas.

GDI alto y muy altos se dan en provincias del sur extremo como Puerto Williams, Punta Arenas y en provincias del altiplano andino con altas velocidades de viento y también altas oscilaciones térmicas.

La ciudad de Concepción tiene 2958 °C día/año de Infiltración con una mayor cantidad de grados día de invierno, ubicándose en el rango medio, de 1500 a 3000 °C día/año, al igual que otras 18 localidades del país. Concepción cuenta con un clima templado con baja oscilación térmica y fuertes vientos.

3.2 Hermeticidad al aire

La hermeticidad es una condición de las edificaciones que se relaciona principalmente con la materialidad y calidad de construcción de su envolvente.

Cuando se refiere a la capacidad de permitir el paso de aire a través de la piel del edificio se denomina hermeticidad al aire y cuando se quiere explicitar la capacidad de la piel de impedir el paso de aire se denomina hermeticidad, por lo tanto entre más hermético (menor valor n50) menor cantidad de aire logra penetrar a través de la piel del edificio.

La hermeticidad depende principalmente de la materialidad predominante en muros, debido a la porción que éstos representan de la envolvente. Los materiales como hormigón son denominados intrínsecamente herméticos, debido a la constitución del material. La materialidad madera, utilizada como entramado, en cambio, es intrínsecamente permeable, por estar constituida por partes sobrepuestas, con gran cantidad de uniones.

3.2.1 Indicadores para expresar la hermeticidad

La hermeticidad al aire es una característica de la envolvente de una construcción, que representa su capacidad de oponerse al paso de aire, para conocer esta cualidad es necesario expresarla con indicadores cuantificables, que permitan sintetizar las características y propiedades de la envolvente.

q₅₀ (caudal): Expresa el caudal que fluye a través de la envolvente del edificio sometido a una diferencia de 50 Pascales, expresado en $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$. Es utilizado en algunos países europeos como Inglaterra, entre otros.

$$q_{50} = \frac{V_{50}}{\text{Area}_{\text{Envolvente}}} \quad \text{Eq. 4}$$

n₅₀ (Cambios de aire por hora a 50 Pascales): Expresa el número de veces que se renueva el aire de un edificio durante una hora (**1/h**) sometido éste a una presión diferencial de 50 Pascales. Este indicador es utilizado en la mayoría de los países de Europa con fines normativos, por ejemplo en Alemania, Francia, y también en Chile.

$$n_{50} = \frac{V_{50}}{V} \quad \text{Eq. 5}$$

ELA (Área equivalente de pérdida): Expresa el área de salida (m^2) de un orificio del tamaño acumulativo de todos los puntos de escape de aire del edificio a un diferencial de presión de 4 Pascales. Este indicador es utilizado en Europa y EE.UU.

$$ELA = C_o \left(\frac{\rho_o}{2}\right)^{0,5} (\Delta P_\gamma)^{n-0,5} \quad \text{Eq. 6}$$

NL (Coeficiente de infiltración normalizado): Valor **adimensional** calculado a partir del área de infiltración (As a 4 Pa), normalizada por el área de piso para describir la hermeticidad relativa de la envolvente. Es utilizado en EE.UU. y Canadá.

$$NL = \frac{ELA}{Area_{piso} \left(\frac{H}{2,5m}\right)^{0,3}} \quad \text{Eq. 7}$$

Todos estos indicadores se basan en las mediciones de caudal de aire que pasa por un ventilador al realizar la prueba de Blower Door

3.3 Test de presurización mediante ventilador

Esta cualidad de la envolvente debe ser cuantificada, para lo que se aplica un test in situ llamado Blower Door Test o Test de presurización por medio de ventilador (AENOR, 2002; ASTM, 2011; Instituto Nacional de Normalización, 2013)

Este test consiste en la instalación de un ventilador en una puerta o ventana, como se muestra en Figura 5 y en Figura 6. Dicho ventilador introduce o extrae aire hacia o desde el interior de un recinto, para crear un diferencial de presión suficiente para minimizar la influencia de las condicionantes climáticas y el efecto stack.



Figura 5: Blower Door modelo Minneapolis, disponible en CITEC UBB (Fuente: Elaboración propia)



Figura 6: Equipo de ventana utilizado en Hochschule Bieberach (Fuente: Elaboración propia)

El equipo consta de un medidor de flujo que permite saber la cantidad de aire que entra al presurizar o sale por el ventilador al despresurizar un recinto. El flujo de aire para un ensayo completo se calcula como:

$$Q = C (\Delta P)^n \quad \text{Eq. 8}$$

Donde:

- Q Flujo de aire medido (m^3/s)
- C Coeficiente del aire filtrado $m^3/(s Pa^n)$
- ΔP Diferencia de presión inducida (Pa)
- n Exponente de flujo

El exponente de flujo n permite evaluar si se trata de un flujo turbulento (cuando tiende a 0,5) o un flujo laminar (cuando tiende a 1).

El coeficiente de flujo filtrado C puede ser interpretado como la tasa inducida por unidad de presión diferencial e incluye en su definición las características geométricas de el flujo, por lo que difiere de un caso a otro.

El equipo Blower Door permite también identificar algunos puntos o zonas donde se producen infiltraciones. Para identificar su localización se pueden utilizar cuatro métodos.

El primero utiliza un anemómetro con sonda telescópica de gran precisión, que permite identificar flujos. Este método presenta como desventaja que una grieta muy pequeña puede presentar una alta velocidad de aire, lo que no significa que se produzca una gran pérdida de aire por ese punto.

El segundo método consiste en generar humo con un “lápiz de humo” (Figura 7) u otro elemento y acercar la fuente de humo a los lugares donde se cree que existen grietas o vías de escape por la envolvente. Este método es de fácil implementación y permite visualizar desde el interior dónde se localizan las grietas. Debido a la reducida capacidad de producir humo y a que el laboratorista o encargado de la prueba se encuentra al interior del edificio, no es posible utilizarlo en forma extendida, por lo que se necesitan conocimientos previos de donde se ubican las singularidades (Citec UBB & Decon UC, 2014, Chapter 5).



Figura 7: Lápiz de humo utilizado para encontrar puntos de fuga durante el test de presurización Blower Door (Fuente: <http://www.conservationstrategies.com>)

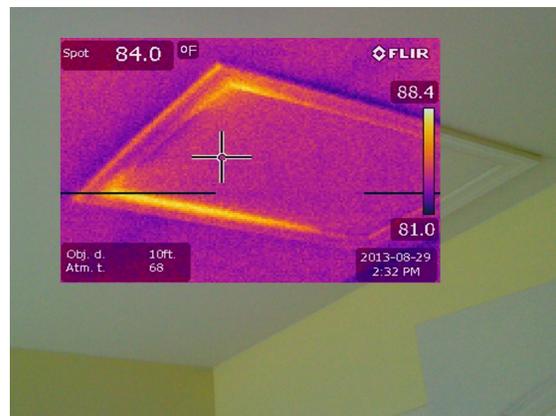


Figura 8: Termografía combinada con test de presurización que permite ver la fuga de aire por tapa de entretecho. (Fuente: <http://www.winhomeinspectionelizabethtown.com>)

El tercer método se realiza con una cámara termográfica que permite visualizar los puntos fríos al interior de una edificación como se muestra en Figura 8. En este caso se pueden confundir puentes térmicos con infiltraciones, aunque la literatura explica que las infiltraciones deberían verse con bordes difusos. Para climas templados como Chile, esta técnica exige aumentar la temperatura al interior para poder visualizar las pérdidas de calor, lo que dificulta su aplicación.

La cuarta técnica supone llenar el edificio con humo sintético, para poder observar desde el exterior por qué zonas de la envolvente escapa el humo, como se observa en Figura 9. La principal limitante de esta técnica es que permite observar por donde se pierde aire, pero en algunos casos, el punto de egreso no coincide con la ubicación de la grieta, esto es especialmente cierto en edificaciones basadas en capas de materiales, como entramados de madera o muros con revestimientos entramados.



Figura 9: Técnica de identificación de puntos de fuga con humo. (Fuente: CITEC UBB)

3.4 Impacto de las infiltraciones de aire

Las infiltraciones de aire impactan a distintos niveles en la habitabilidad (Berge, 2011) como se explica a continuación.

3.4.1 Demanda energética

Las infiltraciones de aire afectan la demanda cuando ingresa aire no acondicionado a las edificaciones, ya sea a menor temperatura que la temperatura interior de confort en invierno, o a mayor temperatura en verano. Esto significa que existe una mayor cantidad de aire a acondicionar, por lo tanto una mayor demanda de energía. Esto también afecta el consumo energético ya que se produce un mayor requerimiento a los equipos, que actualmente no está considerado en el dimensionamiento, esto significa que los equipos deben funcionar más y con un rendimiento distinto al de diseño.

3.4.2 Transmisión de ruido

Las grietas y orificios en la envolvente no oponen la misma resistencia al traspaso de ruido como los elementos sólidos de la envolvente, lo que redundará en una mayor transmisión de ruido, lo que afecta el confort acústico al interior de los recintos.

3.4.3 Calidad del aire

Como consecuencia de este fenómeno aumenta la cantidad de aire que ingresa a los edificios. Esto podría ser considerado como positivo, ya que aporta a la dilución de contaminantes generados al interior, pero es necesario considerar que al ser un flujo de aire no controlado, los aspectos negativos superan a los positivos. El diseño de la ventilación debe considerar la dilución de contaminantes, para controlar de mejor forma su funcionamiento y ubicar los sistemas de ventilación en proximidad a las fuentes de contaminantes.

Asimismo, el paso incontrolado de aire permite que contaminantes exteriores ingresen a las edificaciones. Esto es controlable al diseñar sistemas de ventilación, ya sea utilizando filtros o evitando ventilar en los momentos que existe una mayor concentración de contaminantes. Por

ejemplo, si un recinto se encuentra próximo a una calle de alto flujo, se preferirá abrir ventanas cuando el flujo sea menor.

En la zona costera del centro y sur de Chile, durante el invierno, se combinan bajas temperaturas con alta humedad relativa del aire, la que penetra en las edificaciones por las grietas y aberturas no intencionadas de la envolvente, aumentando la humedad al interior. Esta situación combinada con sistemas de calefacción que producen vapor de agua como subproducto de la combustión (leña, gas, parafina, etc.) provoca problemas de calidad del aire y condensación al interior de los recintos.

3.4.4 Humedad

Las fuentes de humedad interior, como subproductos de la combustión, vapor de agua derivado del cocinar o uso del baño, humedad resultante de la respiración y transpiración de los ocupantes, entre otros, aumentan la humedad relativa al interior de los recintos. Cuando este fenómeno se combina con una mayor presión al interior, el aire, a temperatura de confort y cargado de humedad, migra hacia el exterior a través de la envolvente. En su paso va perdiendo temperatura y con esto, capacidad de soportar humedad, lo que produce que en las grietas aumente la humedad, creando un ambiente apto para el crecimiento de hongos, algas y moho, y en casos extremos condensación al interior del muro. Ambos fenómenos son muy perjudiciales para la vida útil de los materiales de construcción y en caso de producirse hongos, moho o algas, éstos pueden afectar a la salud de las personas.

3.4.5 Confort térmico

Al existir infiltraciones de aire, será más difícil llegar a temperaturas de confort, y en algunos casos dependiendo del dimensionamiento de los equipos, esto será imposible.

Las infiltraciones también producen flujos de aire, que pueden ser percibidos por el ser humano, lo que causa molestia. Cuando el aire que ingresa está a menor temperatura, esta diferencia puede ser percibida por los ocupantes, que percibirán una temperatura menor a la ambiental.

3.5 Cálculo de infiltraciones de aire

Existen varias metodologías para el cálculo de las infiltraciones de aire a partir de valores de hermeticidad y datos de clima. Se presentan algunos modelos aplicados al cálculo, partiendo desde los más simplificados hasta otros más complejos.

3.5.1 Modelo de Persily-Kronvall

Este modelo atribuido (aunque negado por ellos) a Kronvall y Persily, simplifica la relación entre el resultado de una medición con Blower Door a 50 Pa y las infiltraciones de aire.

$$ACH = \frac{ACH_{50}}{20} \quad \text{Eq. 9}$$

Esta ecuación es conocida como "rule of thumb", o regla de oro, aunque su validez es muy discutida. Este modelo no considera factores climáticos en el cálculo y es del tipo empírico, basado en estudios de campo realizados en New Jersey y Suecia utilizando el método del Blower Door y mediciones de cambios de aire con el método de gas trazador por dilución (Alfano, Dell'Isola, Ficco, & Tassini, 2012).

3.5.2 Modelo LBL

Este modelo fue desarrollado en el Lawrence Berkley Laboratories en los años ochenta y considera en la ecuación factores climáticos como la velocidad del viento y el diferencial de temperatura y la calidad hermética de la envolvente a través del indicador ELA. Las constantes utilizadas se refieren al terreno y nivel de exposición, para el cálculo asociado a la velocidad del viento, para el cálculo del efecto stack la constante relaciona la distribución del flujo y altura del edificio. En Figura 10 se explica gráficamente el proceso de cálculo.

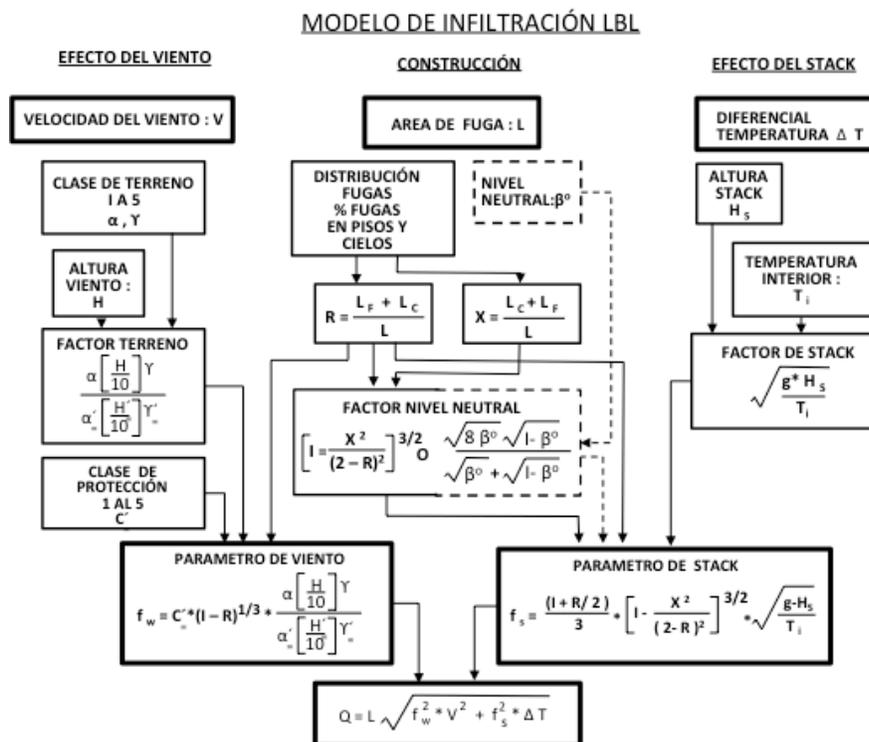


Figura 10: Representación esquemática del modelo LBL de infiltración. (Fuente: Modera, Sherman, & Levin, 1983)

3.5.3 Modelo Básico de ASHRAE

Este modelo aparece en el libro Fundamentals de ASHRAE (ASHRAE, 2009). Es un modelo unizona, por lo tanto sólo es apropiado para edificios pequeños sin resistencia interior al flujo de aire. Este modelo utiliza el ELA o área efectiva de fuga a 4 Pa, que se obtiene de una medición con Blower Door como indicador de la calidad hermética de la envolvente, y la superposición del diferencial de temperatura multiplicado por un coeficiente de stack y la velocidad del viento al cuadrado multiplicada por un coeficiente de viento.

$$Q = ELA \sqrt{C_s \Delta t + C_w U^2} \tag{Eq. 10}$$

$$ACH = Q/V \tag{Eq. 11}$$

Donde

Q = flujo de aire

ELA = área efectiva de fuga

C_s = coeficiente de stack ($cfm^2/(in^4 \text{ } ^\circ F)$)

Δt = Diferencial de temperatura interior exterior promedio para el intervalo de tiempo

C_w = Coeficiente de viento ($cfm^2/(in^4 \text{ } ^\circ F)$)

U = Velocidad de viento promedio para el intervalo de tiempo

Los coeficientes característicos C_s se presentan en la Tabla 13 para viviendas hasta tres pisos. El valor del coeficiente de viento C_w depende de la clase de exposición de la vivienda y de la altura a la que se encuentra. Las clases de exposición se presentan en la Tabla 14 y el coeficiente de presión de viento C_w por clase de exposición y altura se presenta en la

Tabla 15.

Tabla 13: Coeficientes stack C_s del modelo LBL

	Altura en pisos		
	uno	dos	tres
Coficiente Stack	0,000 145	0,000 290	0,000 435

(Fuente: ASHRAE, 2009)

Tabla 14: Clases de protecciones locales

Descripción de clases de obstrucciones	
1	No hay obstrucciones o apantallamientos locales.
2	Protección típica para una vivienda aislada rural.
3	Protección típica causada por edificaciones en la acera frente a la vivienda en estudio.
4	Protección típica para edificaciones urbanas en sitios grandes, donde los obstáculos están ubicados a una distancia mayor a la altura del edificio en estudio.
5	Protección típica causada por edificios u otras construcciones ubicadas a una distancia menor a la altura del edificio en estudio. Por ejemplo, viviendas al mismo lado de la calzada, árboles, arbustos, etc.

(Fuente: ASHRAE, 2009)

Tabla 15: Coeficientes de viento Cw del modelo LBL

Clase	Altura en pisos		
	uno	dos	tres
1	0,000319	0,000420	0,000494
2	0,000246	0,000325	0,000382
3	0,000174	0,000231	0,000271
4	0,000104	0,000137	0,000161
5	0,000032	0,000042	0,000049

(Fuente: ASHRAE, 2009)

3.5.4 Modelo de cálculo de infiltración LBL mejorado.

Este modelo, desarrollado por Walker y Wilson (1998), utiliza los parámetros de la ley de potencia para calcular los flujos debido a la presión del viento y el efecto de chimenea o Stack. Esto obliga a realizar una descripción más detallada del edificio pero utiliza la misma ecuación de superposición que el modelo básico de infiltración.

La exactitud de predicción del modelo mejorado puede ser muy buena, típicamente $\pm 10\%$, cuando los coeficientes son bien conocidos para el edificio en cuestión (M. H. Sherman & Modera, 1986). Los modelos de una sola zona son sensibles a los valores de entradas por lo que la calidad de la predicción, como en toda herramienta numérica, está en directa relación también con la calidad de la información que se utiliza.

El modelo permite obtener también tasas de flujos de aire por infiltraciones e infiltraciones características, separadas por efecto chimenea y viento, calculadas como sigue:

$$Q = \sqrt{Q_s^2 + Q_w^2} \tag{Eq. 12}$$

Donde:

Q : Caudal de flujo de aire, (m^3/s)

Q_s : Caudal por efecto chimenea, (m^3/s)

Q_w : Caudal por efecto viento, (m^3/s)

Efecto chimenea

$$Q_s = cC_s \cdot \Delta t^n \quad \text{Eq. 13}$$

Donde:

c : coeficiente de flujo $m^3/(s/P_a^n)$

C_s : coeficiente de chimenea, $(P_a/K)^n$

Efecto viento

$$Q_w = cC_w \cdot (sU)^{2n} \quad \text{Eq. 14}$$

Donde:

c : Coeficiente de flujo, $(m^3 / (s/Pa^n))$

C_s : Coeficiente de Stack, (Pa/K)

C_w : Coeficiente de Viento, (Pa^2 / m^2)

s : Factor de protección

U : Velocidad del viento corregida

Los coeficientes de viento (C_w) y stack (C_s) de esta ecuación se definen en Tabla 17, el coeficiente de flujo c y el exponente de presión n se obtienen de las mediciones realizadas mediante test de presurización. Las velocidades de viento se multiplican por el factor de corrección G, según Tabla 16.

Tabla 16: Multiplicador de velocidad del viento G

	Altura vivienda (en pisos)		
	uno	dos	tres
Multiplicador de velocidad del viento G	0,48	0,59	0,67

(Fuente: ASHRAE, 2009)

Tabla 17: Coeficientes de Stack y Viento para modelo de cálculo de infiltración LBL mejorado

	Un piso		Dos pisos		Tres pisos	
	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con
Chimenea						
C_s :	0,054	0,069	0,078	0,089	0,098	0,107
C_w para losa de hormigón	0,156	0,142	0,170	0,156	0,170	0,167
C_w para piso ventilado	0,128	0,128	0,142	0,142	0,151	0,154

(Fuente: ASHRAE, 2009)

El modelo LBL Mejorado permite finalmente establecer los coeficientes de infiltración normalizados o característicos ACH (1/h) por modelo de vivienda y localidad. Coeficiente normalmente asumido como 1 (1/h) en las herramientas oficiales de cálculo de demandas energéticas en Chile. El mismo valor se suele utilizar por defecto en estudios energéticos de naturaleza similar en ausencia de información confiable. Este coeficiente de infiltración normalizada vincula variables climatológicas locales con las propiedades de hermeticidad propia de las construcciones típicas locales.

3.6 Métodos de limitación de las Infiltraciones a nivel nacional e internacional

La hermeticidad al aire de las edificaciones es considerada actualmente por la mayoría de los países desarrollados en sus respectivos sistemas de reglamentación de la edificación.

Una zonificación territorial es una de las formas de establecer diferenciaciones en las exigencias, y está ligada a la variable clima. Sin embargo, existen otros criterios de clasificación que permiten diferenciar exigencias: sistema de agrupamiento, tamaño, sistema de ventilación, entre otros. En esta presentación se categorizan según dicho criterio las normativas de los distintos países:

Modelo Unizona: donde se establece una exigencia única (valor límite) para todo el territorio nacional. Es el caso de Inglaterra, Alemania y la mayoría de los países europeos.

Modelo Multizona: Implica la subdivisión del territorio nacional en varias zonas, justificado por características climáticas, donde la exigencia es diferenciada para cada una de las zonas. Es el caso de EEUU, Canadá y España, entre otros.

3.6.1 Modelo unizona

Se explica brevemente el caso de Inglaterra y Alemania, países que han establecido exigencias respecto al control de las infiltraciones de aire sin diferenciar respecto a la localidad y clima donde se emplaza el edificio.

3.6.1.1 Inglaterra

En Inglaterra, las exigencias respecto a la permeabilidad de las construcciones van ligadas al desempeño energético del edificio, y se estipulan en los Documentos Aprobados L1A (Department of communities and local government, 2010a, 2010b) y L2A, donde se establece una serie de parámetros límite para asegurar una adecuada conservación del combustible y de la energía en las edificaciones, siendo el primero el instrumento que regula a los nuevos edificios de vivienda y, el segundo a los nuevos edificios no habitacionales.

En lo que respecta a la estanqueidad al aire, ambos códigos establecen que la máxima permeabilidad al aire que la envolvente de un edificio puede presentar, ya sea habitacional o no habitacional, es de $10\text{m}^3/\text{hm}^2$ al someterlos a un diferencial de presión de 50 Pascales. Esta exigencia aplica indistintamente a todo el territorio nacional.

El método de verificación del cumplimiento de la exigencia es realizar un ensayo de presurización por medio de ventilador (Blower Door). El valor que se obtenga de este ensayo se utilizará para calcular el índice de emisiones de CO_2 de dicha edificación, que es el indicador de la eficiencia energética, y que finalmente demostrará el cumplimiento de la edificación con los estándares de desempeño energético. En general, todas las edificaciones deben ser ensayadas y, en el caso de no cumplir con la exigencia, deben llevarse a cabo medidas remediales que permitan reducir la permeabilidad al aire de dicha edificación.

3.6.1.2 Alemania

En forma similar a como ocurre en Inglaterra, la reglamentación de la edificación alemana incluye las infiltraciones de aire a través de la envolvente de los edificios como uno de los factores a considerar en el desempeño energético de la edificación, según la norma DIN V 18599(Deutsches Institut für Normung, 2007), donde se calcula la demanda primaria de energía del edificio a evaluar, y se compara con un “edificio de referencia”, el cual posee la misma distribución e idéntico uso que el edificio evaluado, pero calculado con valores de referencia que representan los estándares mínimos con los que debe cumplir la envolvente del edificio y sus sistemas. Estos valores están estipulados en la ordenanza de conservación de energía EnEV 2009 (Tuschinski, 2014).

En lo que respecta a la hermeticidad al aire de las edificaciones, se considera en el cálculo de la demanda primaria de energía tanto la permeabilidad de la envolvente del edificio como la permeabilidad de las ventanas. Respecto a la envolvente, el valor que se utilice en el cálculo será el obtenido al realizar un ensayo de presurización por medio de ventilador a un diferencial de presión de 50 Pa, cuyo valor no debe superar:

- 3.0 renovaciones de aire hora (1/h) para edificios sin sistemas de ventilación mecánicos
- 1.5 renovaciones de aire hora (1/h) para edificios con sistemas de ventilación mecánicos

En caso de no realizarse el ensayo, se asumirán los siguientes valores por defecto, a un diferencial de presión de 50 Pa:

- 2.0 renovaciones de aire hora (1/h) para edificios sin sistemas de ventilación mecánicos
- 1.0 renovaciones de aire hora (1/h) para edificios con sistemas de ventilación mecánicos

En cuanto a las ventanas, la ordenanza estipula las clases de ventanas según permeabilidad de las juntas ensayadas a un diferencial de presión de 100 Pa, que deben ser utilizadas de acuerdo a la cantidad de pisos que posea la edificación. La clasificación de ventanas se realiza según la norma DIN EN 12207-1: 2000-06 y se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 18: Clasificación de ventanas según norma DIN EN 12207:1 2000-06

Clase	Permeabilidad al aire a 100 Pa [m3/h m2]	Permeabilidad al aire a 100 Pa [m3/h m]	Presión máxima de ensayo [Pa]
0	Sin Ensayar	Sin Ensayar	Sin Ensayar
1	≤50	≤12,5	150
2	≤27	≤6,75	300
3	≤9	≤2,25	600

(Fuente: DIN EN 12207:1 2000-06)

La clase de ventana a utilizar se determinará según el número de pisos de la edificación, de acuerdo a la tabla siguiente:

Tabla 19: Clase de Permeabilidad al Aire según DIN EN 207-1: 2000-06

Número de Pisos del Edificio	Clase de Permeabilidad al Aire según DIN EN 12 207-1:2000-06
Hasta 2 Pisos	2
Más de 2 Pisos	3

(Fuente: DIN EN 12207:1 2000-06)

Cabe destacar que las exigencias antes nombradas no discriminan la localización del edificio, exigiéndose los mismos estándares de permeabilidad al aire de la envolvente y de las ventanas para todo el territorio nacional. Sin embargo, sí se utilizan otros criterios de clasificación para diferenciar las exigencias establecidas. Esto es, sistema de ventilación en el caso de las

infiltraciones de aire a través de la envolvente, y número de pisos para la permeabilidad al aire de las ventanas.

3.6.2 Modelo multizona

Los siguientes casos analizados corresponden a países que presentan diversidad climática en su territorio, motivo por el cual han considerado formas de zonificación territorial que permitan diferenciar el establecimiento de exigencias ligadas al control de las infiltraciones de acuerdo al clima donde se localice la edificación.

3.6.2.1 España

En España, los requisitos ligados a las infiltraciones de aire están estipulados en el Código Técnico de la Edificación de España (Norma Española, 2009), código prestacional que aborda dichas exigencias como parte de la limitación de demanda energética de las edificaciones. Este código limita sólo la permeabilidad al aire de las carpinterías de huecos y no la del edificio en su conjunto, diferenciando valores límite según zona climática. Los valores exigidos son los siguientes:

- para las zonas climáticas C, D y E: 27 m³/h m² medidos con una sobrepresión de 100 Pa
- para las zonas climáticas A y B: 50 m³/h m² medidos con una sobrepresión de 100 Pa

La zonificación climática establecida por el Código Técnico de la Edificación se establece en función de grados día y radiación solar, definiéndose cinco divisiones según severidad climática de invierno (A, B, C, D, E) y cuatro divisiones según severidad climática de verano (1, 2, 3, 4), que combinadamente sumarían veinte zonas. Sin embargo, se han retenido y adoptado doce ellas.

SC (verano)	A4	B4	C4		E1
	A3	B3	C3	D3	
			C2	D2	
			C1	D1	
SC (invierno)					

Figura 1: Zona climáticas en España, según severidad climática (SC) de invierno y verano [1].

3.6.2.2 EEUU Y Canadá

El modelo Norteamericano muestra una forma distinta de abordar el tema de las infiltraciones de aire a través de la envolvente respecto a los modelos Europeos, lo cual se debe en gran parte a la diversidad de climas presentes en dicho territorio, lo cual hace impracticable aplicar las mismas exigencias a todas las edificaciones, independiente de su localización.

En Estados Unidos y Canadá, la Norma ANSI/ASHRAE 119-1988 (ASHRAE, 2004) establece los estándares de clases de infiltración aceptables para edificios residenciales unifamiliares por zonas territorio. Dichas zonas territorio son clasificadas de acuerdo a los grados días de infiltración, entendidos como una medida de la severidad del clima que afecta las cargas de infiltración, de modo similar a los grados días de calefacción como medida de la severidad del periodo de calefacción. La norma, por ende, pretende reducir el consumo energético asociado a las pérdidas de aire a través de la envolvente de las viviendas, y la zonificación adoptada atiende a la gran variedad de condiciones climáticas en el territorio de los EEUU y cómo éste afecta las cargas de infiltración que solicitan a la envolvente.

Para cada zona territorio se establecen clases aceptables de infiltración, utilizando el concepto de infiltración normalizada L_n , valor adimensional calculado a través del área de infiltración, altura del edificio y la superficie de piso de la vivienda, describiendo la hermeticidad al aire relativa de la envolvente. Se distinguen así ocho zonas territorio y diez clases de infiltración aceptables.

Para distinguir qué clase de infiltración debe cumplir una vivienda en una determinada zona territorio existen tres métodos: la tabla de localización, el método de cálculo de los grados días de infiltración y el mapa de clasificación. La tabla de clasificación es el método principal para determinar la clase de infiltración requerida, y debe ser utilizada para todas las localidades listadas en ella. El método de cálculo de grados días debe ser utilizado para todas aquellas localidades que no están listadas en la tabla anteriormente mencionada, pero para las cuales existe o hay disponible información climática diaria horaria para un año tipo y el mapa de clasificación, cuando no se pueda hacer referencia a ninguno de los dos métodos anteriores.

Una vez definido el rango de clase de infiltración que debe cumplir la vivienda, el método de verificación de dicho requisito se debe realizar según lo establece la ASTM E779-87 “Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization” y/o CAN/CGSB-149.10-M86 “Determination of the Airtightness of Building Envelopes by the Fan Depressurization Method”. Ambos métodos de verificación difieren en la forma en que se realiza el ensayo y en el procedimiento de cálculo, pero tienen en común que el diferencial de presión utilizado es 4 Pa y que en ambos se busca el área de infiltración efectiva, que es el área equivalente de un orificio perfecto que, a un diferencial de presión determinado (4 Pa), generará el mismo flujo de aire que el total de rendijas y grietas en la envolvente, y luego esta área se “normaliza” o relaciona con las dimensiones de la edificación, calculándose la infiltración normalizada, que es finalmente el indicador que define las clases de infiltración, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 1: Clases de Infiltración aceptables según ASHRAE 119-1988

Rango de Infiltración Normalizada	Clase de Infiltración
$Ln < 0,1$	A
$0,1 < Ln < 0,14$	B
$0,14 < Ln < 0,2$	C
$0,2 < Ln < 0,28$	D
$0,28 < Ln < 0,4$	E
$0,4 < Ln < 0,57$	F
$0,57 < Ln < 0,8$	G
$0,8 < Ln < 1,13$	H
$1,13 < Ln < 1,6$	I
$1,6 < Ln$	J

(Fuente : ASHRAE 119-1988)

3.7 Conclusiones

Las infiltraciones de aire son dependientes de la calidad hermética de la envolvente de las edificaciones y factores ambientales. Es necesario conocer las condiciones climáticas del lugar de emplazamiento, especialmente la velocidad del viento y el diferencial de temperatura, factores que tienen mucha influencia en el comportamiento de las infiltraciones. La velocidad de viento produce movimiento de aire entre el interior y el exterior por diferencias de presiones y el diferencial de temperatura interior-exterior produce movimientos por efecto Stack.

Para evaluar la hermeticidad al aire se utiliza la técnica del Blower Door Test, la cual está reconocida internacionalmente como referencia. La normativa chilena ya cuenta con disposiciones respecto del ensayo, basada en una norma internacional (Instituto Nacional de Normalización, 2013).

Existen en el mundo múltiples indicadores de hermeticidad al aire, siendo el más utilizado el n50, que se refiere a los cambios de aire interior que se producen por hora a un diferencial de presión de 50 Pa.

Existen fórmulas que permiten el cálculo de las infiltraciones de aire en viviendas a través de la superposición de la velocidad de viento y diferencial de temperatura. Estos métodos están validados y son reconocidos internacionalmente y necesitan información respecto de la hermeticidad al aire de cada edificación.

Capítulo 4 Caracterización constructiva del parque de viviendas en la región del Biobío

Este capítulo presenta un breve análisis de la construcción habitacional masiva que ofrece actualmente el mercado inmobiliario en la región del Biobío, población que se entiende refleja el estado actual del conocimiento, su aplicación a la construcción de materia de hermeticidad al aire y calidad energética de la construcción.

El objeto de esta revisión es poder caracterizar el parque de construcciones para seleccionar una muestra representativa y evaluar su hermeticidad al aire y posteriormente la carga energética asociada a las infiltraciones de aire.

La fuente de información son los Permisos de Edificación autorizados mensualmente por las Direcciones de las Municipalidades de Chile los años 2007, 2010 y 2011, que captura el Formulario Único de Estadísticas de Edificación (FUE). Las estadísticas corresponden a edificación autorizada para sectores privados y públicos destinados a viviendas, que recoge y procesa desde el año 1929 el Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (INE).

Se revisan en particular los sistemas constructivos empleados, forma del agrupamiento de las viviendas y tamaños promedio.

4.1 Intención de construcción habitacional año 2011

El año 2011 el número de viviendas nuevas construidas sumaron 151.071 unidades con 10.431.880 m² de superficie a nivel nacional. Con respecto a 2010, las unidades muestran una alza de 57,3 % y la superficie presenta una variación de un 60 %. Incrementos que se aprecian importantes y que se explican, principalmente, por la necesidad de reposición de viviendas destruidas como consecuencia del terremoto y posterior tsunami del año 2010. El 28,3 % de la superficie construida se concentra en la Región Metropolitana, donde está el 17,6 % de la población nacional y el 44,5 % restante en las 14 regiones del país. De ese total, un 36,9 %

corresponden a departamentos y el resto a viviendas, lo que se condice con el aumento sostenido de la construcción en departamentos en los últimos años. El análisis desagregado por tipo de agrupamiento se presenta en Tabla 20.

Tabla 20: Porcentaje de incidencia de la superficie por destino en cuatro provincias representativas.

Destino	Concepción
Casa aislada	25,2%
Casa continua	1,7%
Casa pareada	21,6%
Departamentos	51,5%

(Fuente: Elaboración propia)

Como se puede observar la cantidad de unidades habitacionales se divide equitativamente entre casas y edificios de departamentos. En este caso se estudian las provincias asociadas a ciudades principales del país, la realidad de la distribución de edificios de viviendas y casas en extensión cambia al referirse a ciudades y pueblos más pequeños.

4.1.1 Sistemas constructivos

Un segundo nivel de análisis considera la desagregación de acuerdo con la clasificación de la Ordenanza General de Construcciones, bajo la denominación material predominante en muros, como se puede observar en Tabla 21. Las estadísticas oficiales identifican a la estructura o sistema constructivo empleado, ubicando en primer lugar al elemento estructuralmente soportante y transmisor de carga y en segundo lugar elementos de revestimiento, de existir. Para los efectos de este estudio se distinguen 8 grupos diferenciados de materiales presentes en el parque.

Tabla 21: Participación de los distintos materiales predominantemente en muros en los distintos sistemas de construcción utilizados el año 2011 a nivel nacional

Materialidad predominante en muros	Edificación total	Número	Superficie	
			m ²	%
Hormigón	7.012.075	54.640	3.841.653	36,8%
Ladrillo	4.112.918	47.655	3.389.983	32,5%
Madera	2.341.414	28.954	1.819.052	17,4%
Bloque cemento	470.225	6.790	425.586	4,1%
Paneles	322.888	3.462	232.206	2,2%
Metal panel preformado	1.776.007	1.128	110.826	1,1%
Adobe	19.060	80	11.776	0,1%
Otros	757.062	8.362	600.806	5,8%

(Fuente: FONDEF D10 I 1025)

Para comprender mejor las implicancias que tiene la utilización de uno u otro material, es necesario realizar el análisis desagregado para considerar el factor climático y cómo algunos sistemas constructivos se adaptan mejor a ciertos climas.

Desde el punto de vista de las infiltraciones sabemos que los materiales homogéneos como hormigón y albañilerías estucadas tienen menores niveles de infiltración que los materiales heterogéneos como paneles, siendo los materiales constituidos por capas (tabiquerías) los con mayor infiltración. De ese análisis se desprende que será necesario estudiar cada materialidad por separado para conocer sus cualidades herméticas.

4.1.2 Materialidad predominante en muros

En esta sección se identifican las combinaciones de materialidad-tipo de agrupamiento-número de pisos, concentrándose en los tipos constructivos que suman el 70 % de las viviendas construidas durante el año 2011.

Como se puede observar en la Figura 11, Concepción presenta las tipologías casa aislada de ladrillo madera dos pisos, ladrillo dos pisos, hormigón dos pisos, madera un piso, madera dos pisos y otras combinaciones dos pisos, así también, presenta edificios de hormigón.

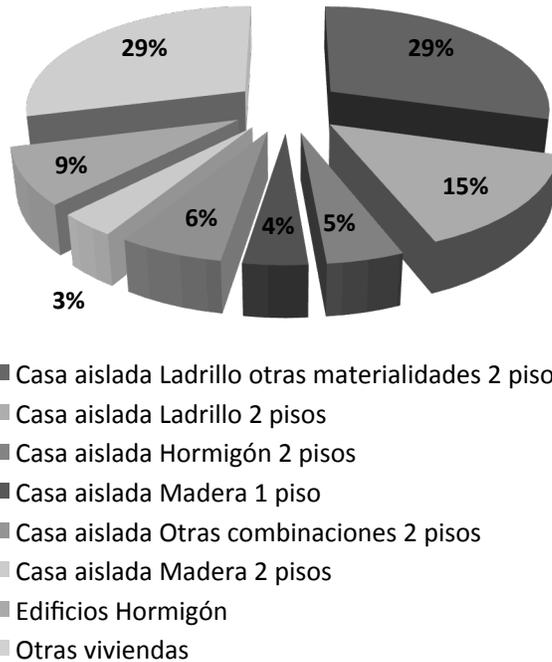


Figura 11: Distribución porcentual de materialidad predominante en muros en edificación habitacional de Concepción. (Fuente: Elaboración propia)

4.1.3 Conclusiones

Se propone una categorización del parque de construcciones construidas el año 2011 en la ciudad de Concepción considerando la materialidad predominante en muros, agrupamiento y cantidad de pisos. Se define finalmente como universo de estudio las viviendas construidas el año 2011 en la provincia de Concepción, Chile.

Capítulo 5 Línea base de hermeticidad al aire de viviendas en Chile

Este trabajo se realizó como parte del proyecto FONDEF D10 I 1025, mediante el cual fue posible realizar evaluaciones de la hermeticidad al aire de la envolvente de 189 viviendas.

Para realizar este trabajo se utilizó la siguiente metodología.

1. Definición de la muestra: En base a la información estadística se caracteriza el parque de edificaciones en función de las variables que se estima influirán en mayor medida en la hermeticidad al aire y se determina una muestra representativa de la misma.

2. Recolección de datos: Se recolectaron datos aplicando la técnica de Blower Door Test antes explicada.

3. Análisis de datos: Se utilizan distintas técnicas estadísticas para establecer inferencias y niveles de significación de factores sujetos de estudio en la hermeticidad. Las principales técnicas son Diagramas box-plot y prueba de Mann Whitney.

4. Establecimiento de línea base: Se utilizan técnicas experimentales combinadas con estadísticas para establecer valores referenciales de hermeticidad o permeabilidad al aire de grupos o tipos de construcción homogéneos de la población objeto de estudio.

5.1 Definición de la muestra

El Instituto Nacional de Normalización, a través del anuario de la edificación, da cuenta de las estadísticas que corresponden a edificación autorizada para sectores privado y público, según destino: vivienda, industria, comercio, establecimientos financieros y servicios para todo el país (Instituto Nacional de Estadísticas, 2011). La fuente de información utilizada son los permisos de edificación otorgados mensualmente por las Direcciones de Obras de las municipalidades, que captura el Formulario Único de Edificación.

Para definir la muestra fue necesario contar con datos desglosados en una mayor cantidad de parámetros que los proporcionados por el Anuario de Edificación, para esto se solicita al INE, a través de Gobierno Transparente, proporcionar información estadística referente a Edificación Autorizada Sector Privado y Público, Obras Nuevas, por Material Predominante en Muro, Número de Viviendas, Tramos de Superficie y Sistemas de Agrupamiento (aisladas, pareadas, continuas y departamentos) desde el 2007 hasta el 2011, desglosada para cada provincia del país.

En base a la información estadística proporcionada por el INE, se caracteriza el parque de edificaciones en función de las variables que se estima influirán en mayor medida en el comportamiento del fenómeno de infiltraciones de aire. Las variables a considerar son: materialidad predominante en muros, agrupamiento y año de construcción.

Mediante técnicas estadísticas, explicadas en (Céspedes Isla, López Sánchez, Vargas Mac-Cardé, & Bobadilla, 2012) se realiza la estimación del tamaño muestral en base a datos de hermeticidad previos, resultando en 135 viviendas con un error de muestreo del 10 % y un nivel de confianza del 95 %, de las cuales 71 corresponden al año 2007 y 64 al año 2010. La muestra considera los cinco niveles de materiales y tres de agrupamiento y la afijación de la muestra es proporcional y considera que por cada categoría deben ensayarse al menos 2 viviendas.

5.2 Recolección de datos

Fue realizada con un equipo de Blower Door y un protocolo de medición basado en la norma UNE-EN 13829 (2002) Aislamiento térmico. Determinación de la estanquidad al aire en edificios. Método de presurización por medio de ventilador.

La elección de los casos fue por conveniencia, considerando cercanía a los investigadores del proyecto Fondef D10 I 1025 y disponibilidad de los propietarios. Otros factores relevantes fueron el tiempo de ensayo, que se estima en 3 horas en terreno, y el clima favorable para el ensayo.

En total se logró recolectar 191 datos, de los cuales dos fueron desechados por tratarse de viviendas no terminadas o con grietas visibles a consecuencia del terremoto. Finalmente se utilizan 198 datos representativos de las distintas categorías definidas.

5.3 Análisis de datos

El análisis de datos fue realizado desde las técnicas más generales hacia las más específicas con el fin de determinar los factores incidentes en los resultados de hermeticidad, para sí poder orientar la definición de la línea base.

5.3.1 Análisis mediante gráficos box-plot entre tipologías similares

Los diagramas de caja y bigotes (box-plot) permiten identificar la distribución y la dispersión de los datos de una variable. En este tipo de gráfico se representa la mediana, los Cuartiles (1 y 3), los valores atípicos y los valores extremos. La estructura de este tipo de gráfico está basada en una caja, donde el límite superior corresponde al valor del tercer cuartil (75 % de los datos) y el límite inferior al primer cuartil (25 %); a su vez, dentro de la caja se incluye una línea representando el valor de la mediana. Las dos barras verticales (bigotes) determinan la distancia o rango del 95 % de los casos. Adicionalmente, el procedimiento anexa algunos símbolos representativos de los valores atípicos mediante puntos.

La Figura 12 muestra la representación en diagrama de cajas de los 189 datos de hermeticidad de construcciones habitacionales. Se muestra por edad y grupo de construcción, la mediana, la dispersión o distancia inferior y superior del 95 % de los casos, en puntos los valores atípicos de cada grupo y la media de toda la muestra.

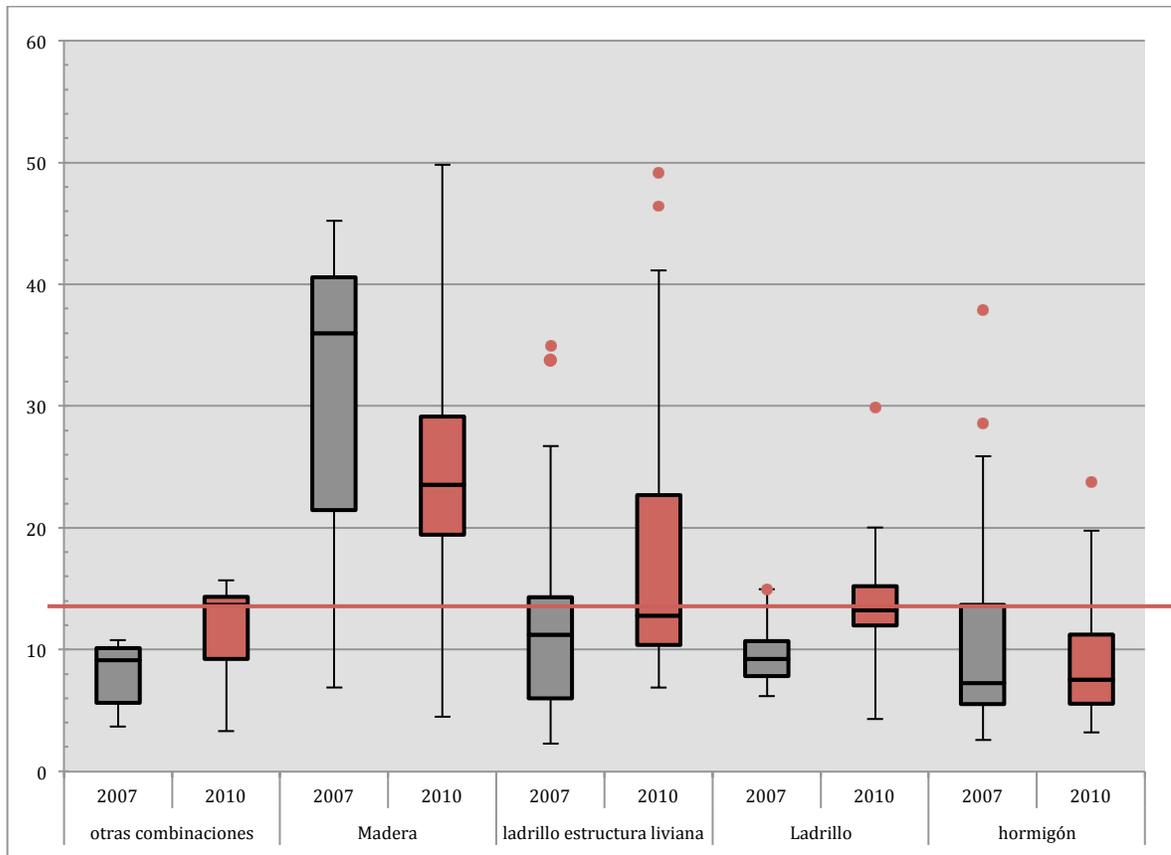


Figura 12: Diagrama de caja para los 189 datos, según año y materialidad. (Fuente: Elaboración propia)

En general se observan medianas simétricas para las materialidades ladrillo en los años 2007 y 2010, y madera 2010. Esto significa que los valores sobre y bajo la media tienen igual dispersión.

Se observa claramente que para las materialidades ladrillo y hormigón se midieron valores menores de infiltración y que en ladrillo los datos son menos dispersos, lo que es congruente con investigaciones internacionales (Carrié & Wouters, 2012; Jokisalo, Kurnitski, Korpi, Kalamees, & Vinha, 2009; Pan, 2010) y la categorización del hormigón como material intrínsecamente hermético y la albañilería como usualmente hermético.

Además, se presentan algunos puntos atípicos para albañilería de ladrillo con estructura liviana, albañilería de ladrillo y hormigón para ambos años. Estos puntos, que se definen en función de las distancias a los cuartiles que representan el 25 y 75 % de la muestra, son casos que se infiere presentan algún tipo de singularidad asociado a problemas de ejecución, calidad de

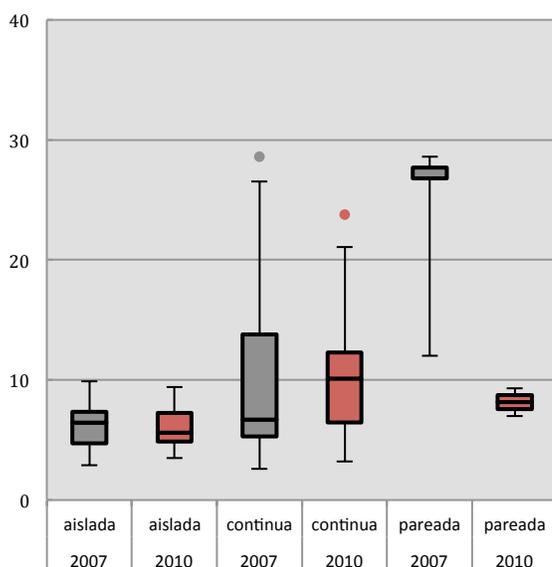
materiales, definición de proyecto, entre otros, que no se extraña apreciar en la edificación habitacional.

En términos generales se observan distintas formas de distribución de datos, esto es, de propiedades de hermeticidad en los cinco grupos de construcción. Diferencias que además se aprecian significativas en los valores de hermeticidad de los cinco tipos de construcción: en los niveles de mejor hermeticidad se encuentra la construcción en hormigón, y la de madera es la que se observa menos hermética. Las dispersiones son también bastante diferentes.

Estas diferencias en este nivel de análisis son compatibles con el tipo de material empleado, sus características de homogeneidad y sistema de construcción y con calidad de ejecución de cáscara; en particular, en la construcción en madera, tipo caracterizado por una mayor cantidad de uniones y ensamblajes susceptibles de fallas y donde la calidad de ejecución tiene un rol mucho mayor.

Para comprender las relaciones entre los datos recabados para cada materialidad se realizan análisis clasificados por agrupación y año de construcción.

5.3.1.1 Hormigón



En la categoría aislada se ven, en Figura 13 más centradas las medias y la longitud de la caja es similar a la de los bigotes. Este tipo de gráfico es el más esperable, ya que la materialidad hormigón, por su tipología constructiva y homogeneidad del material no debería presentar grandes diferencias. La homogeneidad y compacidad de este tipo de construcción resta relevancia a otros factores que influyen en la calidad de la construcción respecto de las infiltraciones, como la calidad de

Figura 13: Diagrama de caja para Hormigón, año de construcción (Fuente: Elaboración propia)

ejecución y calidad de los materiales. Los valores para vivienda aislada se encuentran bajo las 10 renovaciones de aire por hora.

En este gráfico se puede apreciar que existen dos puntos atípicos en la agrupación continua. El correspondiente a vivienda continua 2007 fue afectada por el maremoto, por lo que no se considerará al momento de definir la línea base. En cambio, el punto atípico 2010 es un departamento social. Se cree que el mayor nivel de infiltración se debe a que fue entregado como obra gruesa habitable; es decir, sin reboques de terminación y/o con la ventilación necesaria para un cálfon instalado al interior de la vivienda.

En el caso de viviendas pareadas, se puede apreciar una mayor dispersión que se asocia a características más que de la construcción en hormigón a la de los otros elementos y componentes, que también explican la hermeticidad al aire en este tipo de construcción.

En general, la dispersión de datos en éste y todos los estratos de construcción en hormigón se relacionan con el nivel de hermeticidad de las otras partes o elementos de la construcción, como son ventanas y puertas y complejo de techumbres, que pueden ser muy variadas y más influenciadas por la calidad de ejecución más que con la construcción en hormigón propiamente tal, que es en sí compacta, naturalmente hermética y menos influenciada por la calidad de ejecución. El valor promedio para la categoría hormigón es de 9,0 (1/h) a 50 Pa, con una desviación estándar de 5,3.

5.3.1.2 Albañilería de ladrillo

Se observan, en Figura 14, para los casos de albañilería aislada años 2007 y 2010, y pareada 2010 mayor dispersión de datos, caso contrario para las de tipo continua 2010 y pareada 2007

En general, la dispersión de datos en éste y todos los estratos de construcción, se relacionan con el nivel de hermeticidad de las otras partes o elementos de la construcción, como son ventanas y puertas, pasadas de instalaciones, complejo de techumbres, entre otros, que pueden ser muy variadas y más influenciados que la construcción en albañilería, toda vez que

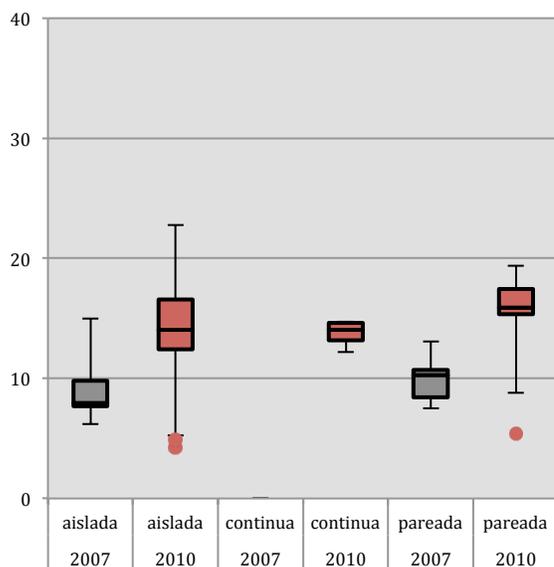


Figura 14: Diagrama de caja para albañilería de ladrillo, año de construcción (Fuente: Elaboración propia)

el proceso constructivo de la confección se deduce bien resuelto. Asimismo, los materiales mortero de hormigón y ladrillo se entienden naturalmente herméticos.

Por otro lado, los valores de n50 para los años 2010 se aprecian relativamente mayores a los de 2007. Si bien es cierto la variable tiempo afecta los niveles de infiltraciones de la envolvente, se estima que tres años de diferencia no deberían afectar significativamente el comportamiento de la edificación, diferencia atribuible a otros factores como los antes mencionados.

El valor promedio para la categoría hormigón es de 11,8 ($1/h$) a 50 Pa, con una desviación estándar de 3,6; valor que se encuentra próximo a la media de la muestra 12,9 ($1/h$).

5.3.1.3 Albañilería de ladrillo con estructura liviana

Se observa la dispersión de datos en todas las tipologías en Figura 15. La mediana de los casos aislada-2007 y pareada 2010 tiene una distribución asimétrica positiva de la mediana; es decir, que los datos bajo la mediana tienen mayor dispersión, mientras que los datos de aislada 2010 y pareada 2010 una distribución asimétrica negativa; es decir, los datos sobre la mediana tienen mayor dispersión. No hay mayores diferencias entre los valores de las tipologías aislada 2010 y aislada 2007. Lo mismo ocurre para el caso de pareadas 2007 y 2010.

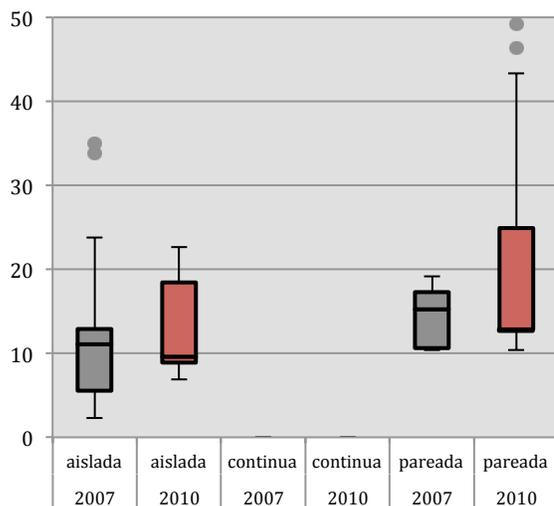


Figura 15: Diagrama de caja para Albañilería de ladrillo con estructura liviana, año de construcción (Fuente: Elaboración propia)

El valor promedio de esta tipología es de 15,0 (1/h) con una desviación estándar de 10,4, un 27 % más que la albañilería de ladrillo, de lo que se deduce debe estar aportando la incorporación de la estructura liviana en el total de la construcción. Las soluciones de estructura liviana corresponden a estructuras de madera y perfilerías de acero, que se entiende más permeable que la albañilería, dada la gran cantidad de singularidades y encuentros, tales como vigas y soleras, encuentros de esquina. En

este caso, la calidad de ejecución y calidad de los materiales determinan en gran medida el desempeño de la vivienda. Asimismo, se infiere que la dispersión de datos se relacionan con el nivel de hermeticidad de las otras partes o elementos de la construcción, como son ventanas y puertas y pasadas de instalaciones.

5.3.1.4 Madera

La mediana de los datos para madera aislada-2007 tienen una distribución asimétrica positiva; es decir, que los datos bajo la mediana tienen mayor dispersión, como se puede observar en Figura 16.

Las viviendas aisladas construidas en el 2010 tienen una mediana centrada, esto quiere decir que los datos sobre y bajo la mediana tienen la misma dispersión, que en este caso es considerada baja. En la categoría pareada 2010 se ve una dispersión baja, lo que puede estar relacionado con la baja cantidad de datos que componen la muestra.

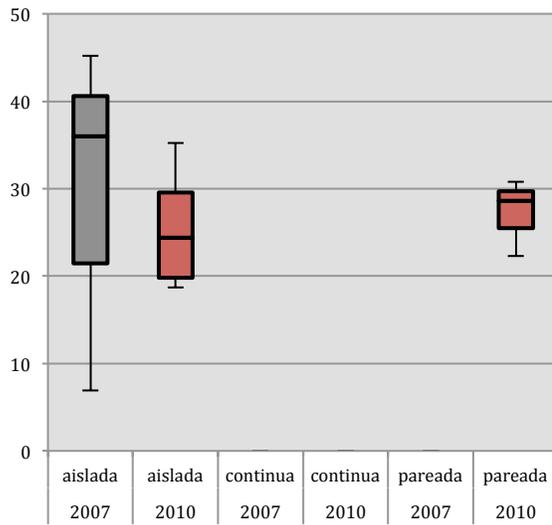


Figura 16:Diagrama de caja para Madera, año de construcción (Fuente: Elaboración propia)

Se puede observar que los valores más altos de infiltración de las cinco tipologías según materialidad predominante en muros se presentan en esta categoría. El valor promedio para madera es de 25 (1/h) a 50 Pa, con una desviación estándar de 12,6, valor casi el doble de la media de la muestra 12,9 (1/h) a 50 Pa. La construcción en madera se caracteriza por una mayor cantidad de uniones y ensambles susceptibles de fallas y donde la calidad de ejecución tiene un rol mucho mayor y que, en conjunto con la calidad de los materiales, determinan mayoritariamente la hermeticidad de la envolvente.

5.3.1.5 Otras materialidades

En esta categoría se agruparon las materialidades con menor presencia nacional. Esto incluye, por ejemplo, paneles de ferrocemento y paneles SIP (construidos con un núcleo de poliestireno expandido y dos placas de madera OSB).

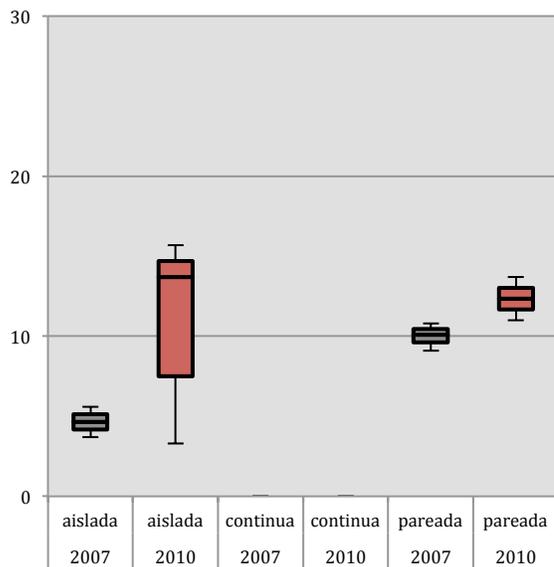


Figura 17: Diagrama de caja para Otras materialidades, año de construcción (Fuente: Elaboración propia)

En Figura 17 se representa una cantidad menor de datos, lo que puede explicar la poca amplitud tanto de las cajas como de sus respectivos bigotes. En el caso de vivienda aislada 2010 se puede ver una mediana asimétrica, donde los datos tienden a estar bajo los 15 (1/h) a 50 Pa. Se produce mayor dispersión de datos bajo la mediana, lo que bien puede explicarse por la heterogeneidad de la muestra. En el resto de los caso no es posible apreciar gran diferencia entre los datos. Claramente, los valores de hermeticidad en esta tipología están determinados por muchos factores, materialidad, puertas y ventanas, sistemas de instalaciones, cantidad y

tipo de uniones, calidad en la ejecución, entre otros, propios de cada sistema constructivo.

El valor promedio para otras combinaciones es de 10,0 (1/h) a 50 Pa, con una desviación estándar de 4,3.

5.3.2 Prueba de Mann – Whitney

La prueba de Mann-Whitney es una técnica no-paramétrica, que se emplea para determinar si hay diferencias entre dos grupos a través de comparación de medianas. Esta metodología se utiliza para tomar decisiones estadísticas sobre la siguiente hipótesis: Si las medianas del Grupo 1 y Grupo 2 son iguales, esta hipótesis se rechaza cuando el p-valor es menor a 0,05, de lo contrario se asume que no difieren en sus medianas (hipótesis nula).

5.3.2.1 Comparaciones de medianas prueba de Mann-Whitney permeabilidad al aire entre año 2007 y 2010 Método A

En este caso se busca diferenciar los años 2007 y 2010, según su materialidad predominante en muros. Esta comparación la realiza a través de la mediana (Tabla 22), metodología utilizada para tomar decisiones estadísticas sobre la siguiente hipótesis: Las medianas del año 2007 y 2010 son iguales, esta hipótesis se rechaza cuando el p-valor es menor a 0,05, de lo contrario se asume que no difieren en sus medianas.

Tabla 22: Comparación de medianas entre años

Materialidad predominante en muros	Mediana		Mann-Whitney	Significancia
	2007	2010	p-valor	
Hormigón	11,0 (n=20)	8,8 (n=40)	0,9812	> 0,05 No significativo
Ladrillo	9,6 (n=18)	13,0 (n=33)	0,000266	< 0,05 Significativo
Ladrillo estructura liviana	12,8 (n=25)	18,3 (n=17)	0,1272	> 0,05 No significativo
Madera	29,4 (n=3)	23,7 (n=16)	0,4072	> 0,05 No significativo
Otras materialidades	11,9 (n=5)	11,3 (n=11)	0,1125	> 0,05 No significativo

(Fuente: FONDEF D10 I 1025)

De los resultados obtenidos se desprende que el p-valor de la materialidad Ladrillo es menor a 0,05; por lo que se rechaza la hipótesis nula; es decir, hay una diferencia significativa entre los valores de ambos años. Se observa un aumento en el valor de infiltración del año 2007 al 2010. Se entiende que el factor tiempo pudiese ser una variable que determine la hermeticidad, sin embargo tres años no son suficientes como para aseverar que el paso del tiempo es la causa de dicho aumento. Se estima otros factores pudiesen estar asociados a esta variación, relacionados con elementos constructivos, instalaciones, calidad de ejecución, entre otros. Las restantes materialidades, ladrillo, ladrillo estructura liviana, madera y otras materialidades, no presentan diferencias estadísticamente significativas entre los años 2007 y 2010.

5.3.2.2 Comparaciones de medianas prueba de Mann-Whitney permeabilidad al aire entre región del Biobío y Metropolitana, método A.

En este caso se busca diferenciar las regiones del Biobío y Metropolitana, según su materialidad predominante en muros. Esta comparación la realiza a través de la mediana, como se aprecia en Tabla 23, metodología utilizada para tomar decisiones estadísticas sobre la siguiente hipótesis: Las medianas de la Región del Biobío y Metropolitana son iguales, esta hipótesis se

rechaza cuando el p-valor es menor a 0,05, de lo contrario se asume que no difieren en sus medianas.

Tabla 23: Comparación de medianas entre regiones utilizando el método A

Materialidad predominante en muros	Mediana método A		Mann-Whitney	Significancia
	Biobío	Metropolitana	p-valor	
Hormigón	11,2 (n=21)	7,1 (n=39)	0,0050	< 0,05 Significativo
Ladrillo	14,2 (n=12)	12 (n=40)	0,1396	> 0,05 No significativo
Ladrillo estructura liviana	12,8 (n=34)	10,4 (n=8)	0,0754	> 0,05 No significativo
Madera	26,7 (n=17)	5,1 (n=2)	No aplica	No aplica
Otras materialidades	13,9 (n=8)	10,5 (n=8)	0,1412	> 0,05 No significativo

(Fuente: FONDEF D10 I 1025)

De los resultados obtenidos se desprende que el p-valor de la materialidad Hormigón es menor a 0,05; por lo que se rechaza la hipótesis nula; es decir, hay una diferencia significativa entre los valores de ambas localidades. Se observan valores menores en la localidad de Santiago para el caso hormigón, mediana de 7,1(1/h), que se compara con 11,2 (1/h) de la localidad de Concepción. En el entendido que la materialidad hormigón es naturalmente hermética, las diferencias pudiesen estar asociadas a otros elementos constructivos que conforman la envolvente o sistemas de instalaciones. Las restantes materialidades, ladrillo, ladrillo estructura liviana y otras materialidades, no presentan diferencias estadísticamente significativas entre los años 2007 y 2010.

5.3.2.3 Comparaciones de medianas prueba de Mann-Whitney permeabilidad al aire entre agrupación y año, método A.

En este caso se busca diferenciar las agrupaciones por año 2007 y 2010, según su materialidad predominante en muros, lo que se grafica en Tabla 24. Esta comparación la realiza a través de la mediana, metodología utilizada para tomar decisiones estadísticas sobre la siguiente hipótesis: Las medianas de los años 2007 y 2010 son iguales, esta hipótesis se rechaza cuando el p-valor es menor a 0,05, de lo contrario se asume que no difieren en sus medianas.

Tabla 24: Comparación de medianas entre agrupación y año

Materialidad predominante en muros	Agrupación	Mediana		Mann-Whitney p-valor	Significancia
		2007	2010		
Hormigón	Aislada	6,25 (n=6)	6,05(n=11)	0,80130	> 0,05 No significativo
	Continua	10,59 (n=11)	9,88 (n=27)	0,59530	> 0,05 No significativo
	Pareada	22,47(n=3)	8,15 (n=2)	0,14890	> 0,05 No significativo
Ladrillo	Aislada (*)	9,21 (n=8)	13,84 (n=23)	0,01470	> 0,05 No significativo
	Continua	--	13,75 (n=4)		
	Pareada(*)	9,92 (n=10)	12,27 (n=7)	0,03580	> 0,05 No significativo
Ladrillo-Estruc. Liviana	Aislada	12,33 (n=20)	13,41 (n=7)	0,63800	> 0,05 No significativo
	Continua	--	--		
	Pareada (*)	14,54 (n=5)	21,72 (n=10)	0,03580	> 0,05 No significativo
Madera	Aislada	29,37 (n=3)	22,90 (n=13)	0,41920	> 0,05 No significativo
	Continua	--	--		
	Pareada		27,23 (n=3)		
otras combinaciones	Aislada	4,65 (n=2)	11,08 (n=9)	0,28880	> 0,05 No significativo
	Continua	--	--		
	Pareada	10,00 (n=3)	12,35 (n=2)	No Aplica	No Aplica

(Fuente: FONDEF D10 I 1025)

De los resultados obtenidos se desprende que el p-valor de todas las variantes analizadas fue mayor a 0,05; por lo que se no se rechaza la hipótesis nula; es decir, no hay una diferencia estadísticamente significativa asociada a las materialidades según agrupación entre los años 2007 y 2010.

5.3.3 Establecimiento de línea base

La línea base se concibe como la primera medición en relación a un indicador que representa una característica en particular, que para el caso de este estudio corresponde a la hermeticidad al aire en la edificación chilena, expresada en renovaciones de aire por hora a un diferencial de presión de 50 Pa, (1/h).

Como se mostró en el análisis estadístico, existe evidencia significativa para la generación de una línea base de hermeticidad al aire de viviendas en el país, considerando que el análisis de los factores explica que la variable materialidad predominante en muros es la más apropiada para la creación de la línea base. Por lo tanto, se consideran las cinco categorías de materialidad predominante en muros: hormigón, ladrillo, ladrillo estructura liviana, madera y otras materialidades.

Por lo tanto la línea base de la edificación habitacional corresponde al valor promedio, en función de la materialidad predominante en muros en sus cinco niveles, con un rango de valores esperados con un 95 % de confianza, como se observa en Figura 18.

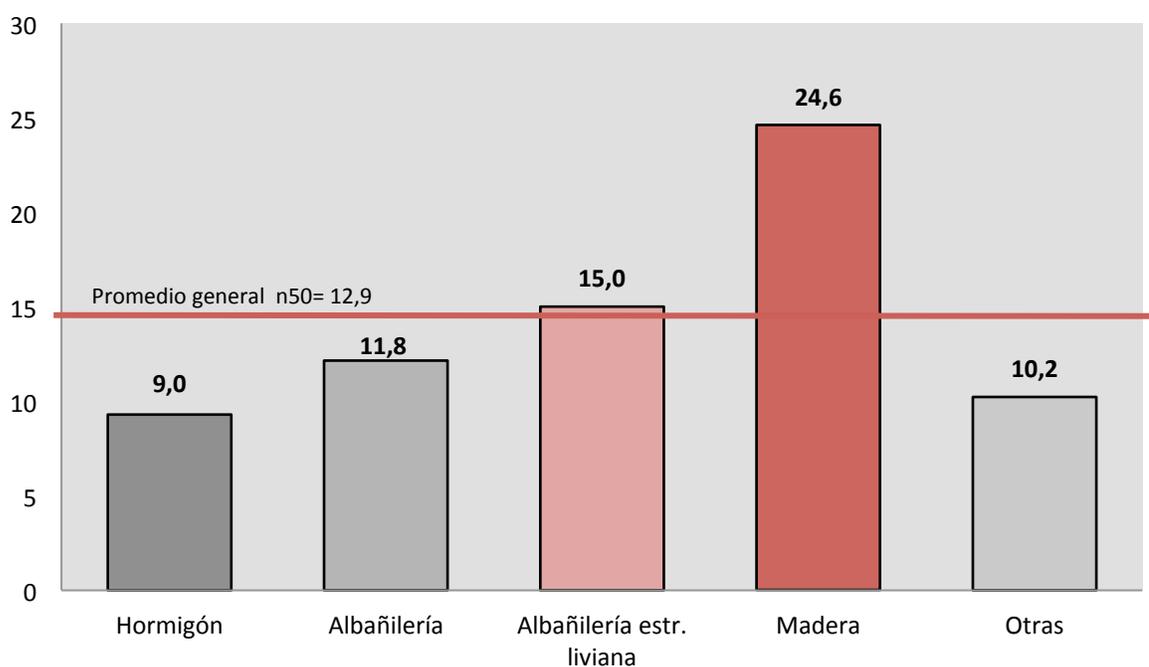


Figura 18: Línea base de la permeabilidad al aire promedio según materialidad predominante en muros. (Fuente: Elaboración propia en base a datos FONDEF: D10 I 1025)

Los valores de línea base según materialidad se resumen a continuación:

- **Vivienda de Hormigón:** 9,0 (1/h) a 50Pa, con valores esperados entre 7,8(1/h) y 11, 2(1/h), con un nivel de confianza del 95 %.
- **Vivienda de Albañilería de ladrillo:** 11,8 (1/h) a 50Pa, con valores esperados entre 10,9(1/h) y 13,4 (1/h), con un nivel de confianza del 95 %.
- **Vivienda de Albañilería de ladrillo y Estructura Liviana:** 15,0 (1/h) a 50Pa, con valores esperados entre 11,7 (1/h) y 18,3(1/h), con un nivel de confianza del 95 %.
- **Vivienda de Madera:** 24,6 (1/h) a 50Pa, con valores esperados entre 18,6(1/h) y 30,6(1/h) ,con un nivel de confianza del 95 %.
- **Vivienda Otras Materialidades:** 10,2 (1/h) a 50Pa, con valores esperados entre 7,9(1/h) y 12,6 (1/h), con un nivel de confianza del 95 %.

El establecimiento de la línea base permite describir la situación actual del construir en Chile, generando un punto inicial y/o punto de partida para posteriores comparaciones. Conocer estos valores permite además hacer un análisis crítico de la calidad hermética de otras construcciones, y en el futuro, evaluar la capacidad de la industria de responder a nuevas exigencias al respecto.

5.4 Conclusiones

La hermeticidad al aire de las viviendas en Chile era una propiedad desconocida hasta que fue estudiada por el proyecto FONDEF D10 I 1025.

Los resultados de la línea base permiten ver que, en general, la hermeticidad al aire de las viviendas es deficiente. La hermeticidad promedio según este estudio es de 12,9 (1/h @ 50 Pa), lo que se compara muy mal con estándares internacionales. Como referencia se puede tomar el caso de Alemania, donde el valor límite es de 3 (1/h @ 50 Pa), o el estándar de vivienda pasiva PassivHaus⁶, que pone como límite el valor 0,6 (1/h @ 50 Pa).

Se observa que en el país la materialidad de los muros tiene gran injerencia en los resultados de hermeticidad al aire, siendo madera la materialidad menos hermética y hormigón y otras materialidades los más herméticos. Esto supone que cada materialidad tendrá que afrontar distintos desafíos para lograr cumplir con las exigencias de hermeticidad de la NTM 011/3 que se encuentra actualmente en estudio.

⁶ Estándar de origen alemán para la construcción y certificación de viviendas que cuenten con un clima interior confortable, una máxima calidad del aire interior, que además aprovecha la energía del sol para una mejor climatización, reduciendo el consumo energético hasta en un 80% en comparación a una construcción convencional.

Capítulo 6 Demanda energética de viviendas tipo para la ciudad de Concepción

Este trabajo se realizó como parte del proyecto FONDEF D10 I 1025, en el cual se realizaron simulaciones energéticas para evaluar el impacto de las infiltraciones de aire sobre las construcciones en las 54 provincias del país. En este capítulo se presenta la información correspondiente a la provincia de Concepción y las simulaciones de demanda energética realizadas para su capital provincial, Concepción.

Para realizar este trabajo se utilizó la siguiente metodología.

1. Definición de la muestra: En base a la información estadística se caracteriza el parque de edificaciones en función de las variables que se estima influirán en mayor medida en el comportamiento del fenómeno de infiltraciones de aire y se determina una muestra representativa de la misma. La muestra se elige para representar un 70 % de las construcciones en Concepción.

2. Recolección de datos: Se recolectó información planimetría de viviendas existentes que cumplen con el perfil definido para cada tipología especificada en el paso anterior.

3. Cálculo de las infiltraciones de aire: Se estudian los métodos existentes y se elige en base a distintos parámetros el modelo más adecuado. Se calcula para cada tipología la infiltración normalizada correspondiente al nivel de hermeticidad de la línea base y factores climáticos de la ciudad de estudio.

4. Simulación de viviendas: Las simulaciones se realizan con software TAS, validado internacionalmente y considerando disponibilidad de licencias y experiencia en el uso del mismo.

5. Ponderación de resultados: Se ponderan los resultados de acuerdo con los porcentajes de representación de cada tipología para la provincia de estudio.

6.1 Definición de la muestra

La población objetivo son todas las viviendas con permisos de construcción solicitados el año 2011 distribuidas en la provincia de Concepción, que suman el 70 % de la superficie que se proyectó construir ese año. Se hace para esos efectos un muestreo dirigido según información recogida directamente de la base de datos otorgada por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) con la que se construyen las estadísticas de edificación en Chile (Instituto Nacional de Estadísticas, 2011). Los datos fueron revisados con software ACCESS.

Las tipologías se definen en función de características diferenciadoras relevantes para el objeto de diagnosticar calidad energética, en los estratos que se presentan en Tabla 25.

Tabla 25: Características diferenciadoras para el estudio de la demanda energética de viviendas

Parámetro	Niveles
Materialidad predominante en muros	Hormigón, ladrillo, bloque de hormigón, madera, otras combinaciones prefabricadas tales como Ferrocemento, Perfil acero galvanizado bajo espesor, System Insulated Panel (SIP).
Agrupamiento	construcción aislada, pareada o continua
Tipo de construcción	vivienda y departamento
Número de pisos	Uno, dos pisos, departamento

(Fuente: Elaboración propia)

Lo anterior permite conformar las 20 tipologías de construcción que se presentan en Tabla 26 y que son representativos del universo sujeto de estudio con sus metrajes medios característicos, para todo Chile:

Tabla 26: Definición de tipologías en estudio para todo el territorio de Chile.

Código	Descripción	Superficie
T1: VAL1A	Vivienda albañilería de ladrillo un piso aislada	66
T2: VAL1P	Vivienda albañilería de ladrillo un piso pareada	66
T3: VAL2A	Vivienda albañilería de ladrillo dos pisos aislada	75
T4: VAL2P	Vivienda albañilería de ladrillo dos pisos pareada	75
T5: VH1A	Vivienda hormigón un piso aislada	66

T6: VH2A	Vivienda hormigón dos pisos aislada	66
T7: VDHYL	Vivienda tipo departamento hormigón y albañilería de ladrillo	46
T8: VBC1A	Vivienda bloque de cemento un piso aislada	50
T9: VBC2A	Vivienda bloque de cemento dos pisos aislada	75
T10: VBC2P	Vivienda bloque de cemento dos pisos pareada	75
T11: VM1A	Vivienda de madera 1 piso aislada	50
T12: VM1P	Vivienda de madera 1 piso pareada	50
T13: VM2A	Vivienda de madera dos pisos aislada	80
T14: VM2P	Vivienda de madera dos pisos pareada	80
T15: VPS1A	Vivienda panel SIP un piso aislada	66
T16: VFC1A	Vivienda ferrocemento un piso aislada	66
T17: VFC2A	Vivienda ferrocemento dos pisos aislada	75
T18: VFC2P	Vivienda ferrocemento dos pisos pareada	75
T19: VALM2A	Vivienda albañilería de ladrillo con segundo piso en estructura liviana de madera aislada	75
T20: VALM2P	Vivienda albañilería de ladrillo con segundo piso en estructura liviana de madera pareada	75

(Fuente: Elaboración propia)

De dichas tipologías se destacan seis, que participan del 70 % de la superficie inscrita el año 2011 en la provincia de Concepción, las que se resumen en Tabla 27.

Tabla 27: Tipologías de sistemas constructivos que representan más del 70 % de las unidades habitacionales inscritas el año 2011 en la provincia de Concepción.

Tipologías presentes en Concepción						
T3	T6	T7	T11	T12	T17	T19

(Fuente: Elaboración propia)

6.2 Recolección de datos

Considerando a los tipos de construcción y tamaños promedios según los datos estadísticos para el año 2011, se levantan y seleccionan proyectos de arquitectura de viviendas que sirven de modelos o patrones para las evaluaciones energéticas. Se seleccionan en total 20 modelos que recogen las características distintivas de la arquitectura y construcción de soluciones habitacionales que ofrece el mercado actualmente en Chile. La fuente de información son proyectos de arquitectura proporcionados por empresas de arquitectura, constructoras e inmobiliarias.

A cada modelo se le asigna una solución constructiva que cumpla con la normativa vigente en la ciudad de Concepción, considerando soluciones típicas, las que en algunos casos superan las exigencias. En figura 19, se presenta a modo de ejemplo la definición morfológica y constructiva de la vivienda correspondiente a la tipología 19. En anexo 1 se presentan las fichas para las seis tipologías restantes.

TIPOLOGÍA		Nº 19		CÓDIGO		VALM2A			
Descripción		Vivienda de albañilería de ladrillos y madera de dos pisos, aislada.							
Superficie	75 m ²	Superficie envolvente	212 m ²	Superficie ventanas	6.05 m ²	Volumen	171 m ³	Factor de Forma	1,24
PLANTA		ELEVACIÓN			3 D				
PRINCIPALES CONFIGURACIONES DE ENVOLVENTES									
			RANGO PROPIEDADES TÉRMICAS U (W/m ² K)						
Muro simple Espesor 14 mm.	Muro estucado Mortero cemento Espesor 25 mm.	Muro con refuerzo térmico EIFS							
Muro simple Espesor 0 mm.	Muro simple Espesor 50 mm.	Muro con refuerzo térmico Espesor 60 mm.							
Techumbre Aislación bajo costaneras	Techumbre Aislación sobre cielo	Piso simple							

Figura 19: Ficha de vivienda tipo simulada (Fuente: FONDEF D10 I 1025)

6.3 Cálculo de las infiltraciones de aire

Para el cálculo de las infiltraciones de aire se utiliza el coeficientes de infiltración normalizado, el cual es calculado para cada tipología considerando el valor de hermeticidad dado por la línea base para cada materialidad y las características climáticas de la zona donde se localiza la construcción.

Para determinar estos coeficientes se utilizó el modelo LBL desarrollado en el Lawrence Berkley Laboratories a principios de los ochenta (Sherman & Modera, 1986) y explicado más en detalle en 3.5.3 Modelo Básico de ASHRAE pag.58 de este mismo texto. Existe una versión básica y otra más avanzada que se diferencian en el carácter y tipo de información que demanda, utilizándose ambas en este caso más bien para efectos de cotejar consistencia.

Como indicador de la calidad hermética de las edificaciones, este modelo considera el área de infiltración efectiva (ELA). Este valor asume que el área total de infiltración corresponde a un orificio que cuantifica el área absoluta de los orificios en el edificio, combinando cada grieta y agujero presente en el edificio en un agujero idealizado, construido en base de un diferencial de presión de 4Pa.

En la Tabla 28 se presentan los valores promedio de ELA para cada materialidad predominante en muros, de acuerdo con las mediciones realizadas para la definición de la línea base.

Tabla 28: Valores promedio de área ELA por m² de envolvente para distintas materialidades

Etiquetas de fila	ELA/m ² envolvente
Hormigón	2,9
Ladrillo	3,9
Ladrillo-Madera-Ladrillo-Metalcón	3,6
Madera	6,7
Metalcón	3,3
Otras combinaciones	1,4
Panel EPS Armado Estucable	1,1
Panel Ferrocemento	3,7
Promedio general	3,7

(Fuente: Línea base de infiltraciones FONDEF D10 I 1025)

Para cada tipología definida se calculó el área de fuga eficaz según los valores presentados en Tabla 28. Los datos de temperatura y velocidad media del viento, necesarios para el cálculo de la infiltración normalizada, fueron tomados de la NCh 1079 Of.2008 (Instituto Nacional de Normalización, 2008).

En Tabla 29 se presentan los coeficientes de infiltración normalizados característicos por tipología constructiva. Se indica en la misma tabla además el coeficiente de infiltración normalizado ponderado característico en la provincia. Indicador que considera la participación, por superficie construida, de los distintos tipos de construcción en el parque de vivienda en referencia a la construcción inscrita el año 2011.

Tabla 29: Coeficientes de infiltración normalizada por tipología constructiva (1/h) en la ciudad de Concepción.

	T3: VAL2A	T6: VH2A	T7: VDHYL	T11: VM1A	T13: VM2A	17: VFC2A	T19: VALM2A	infiltración normalizada ponderada
n50	11,8	9,0	9,0	24,6	24,6	13,7	15,0	
In 1/h	1,4	1,5	2,6	2,3	2,7	1,2	1,4	1,7
Participación en el parque habitacional (%)	23	10	13	6	5	10	35	

(Fuente: Línea base de infiltraciones FONDEF D10 I 1025)

Se puede observar que el valor ponderado es mayor a 1,0 que es el normalmente utilizado en las simulaciones energéticas.

En general, los valores ponderados provinciales mayores están en el rango de más 1 y 2,9 (1/h) y se asocian a localidades más bien costeras, principalmente de la zona centro sur, con velocidades medias anuales sobre los 2,5 m/s y/o temperaturas medias bajas.

Las variaciones en infiltraciones normalizadas por tipología constructiva son bastante más amplias y van desde 1,4 (1/h) para una construcción típica en albañilería a 2,7 (1/h) para una construcción en madera de 2 pisos aislada.

6.4 Simulación de demanda energética de viviendas

En la Tabla 30 se presentan las demandas energéticas por tipología constructiva presente en la ciudad de Concepción. Las simulaciones se realizaron considerando cuatro posibles orientaciones, norte, sur, este, oeste y luego se promediaron para dar un valor único por tipología, las condiciones de simulación se encuentran descritas en detalle en (Citec UBB, 2013)

En este caso se utilizó el software comercial EDSL Tas versión 9.2.1.4, al cual se le ingresaron los valores de infiltración normalizada como valor fijo de infiltración.

6.4.1 Resultados

En el caso de Concepción se realizaron simulaciones para siete casos en cuatro orientaciones, con dos niveles de infiltraciones (cero infiltración e infiltración normalizada), lo que en total significa 56 simulaciones.

Para revisar las demandas se diferencian las cargas en tres categorías: demanda por calefacción, enfriamiento y por infiltraciones. La Tabla 30 incluye también las demandas ponderadas por provincia, indicador que considera la participación, por superficie construida, de los distintos tipos de construcción presentes en el parque de vivienda.

Tabla 30: Demanda energética de construcciones habitacionales en Concepción.

	T3: VAL2A	T6: VH2A	T7: VDHYL	T11: VM1A	T13: VM2A	T17: VFC2A	T19: VALM2 A
In (1/h)	1,4	1,5	2,6	2,3	2,7	1,7	1,4
Cei (KWh/m² año)	61	66	112	106	117	75	61
Dec (KWh/m² año)	114	94	74	125	93	149	175
Der (KWh/m² año)	-	-	-	-	-	-	-
Dett (KWh/m² año)	175	160	186	231	210	225	236
Depp (KWh/m² año)				207			

(Fuente: Línea base de infiltraciones FONDEF D10 I 1025)

- In* : Coeficiente de infiltración normalizado
- Cei* : Carga energética de infiltración
- Der* : Demanda energética de refrigeración
- Dec* : Demanda energética de calefacción
- Det* : Demanda energética total tipo de construcción
- Detp* : Demanda energética total provincial ponderada

En la Figura 20 se grafican las demandas con el propósito de apreciar mejor las diferencias en cada caso. En general se observa que en la ciudad de Concepción no existen necesidades de refrigeración.

La vivienda con menor demanda total es el departamento de hormigón, lo que está relacionado con la baja proporción de superficie en contacto con el exterior y la mejor hermeticidad del material predominante en muros. La vivienda con mayor demanda es la de albañilería en primer piso y segundo piso en madera con 236 kWh/m² año, porcentualmente la vivienda correspondiente a la tipología 19 tiene una demanda un 47% superior al departamento.

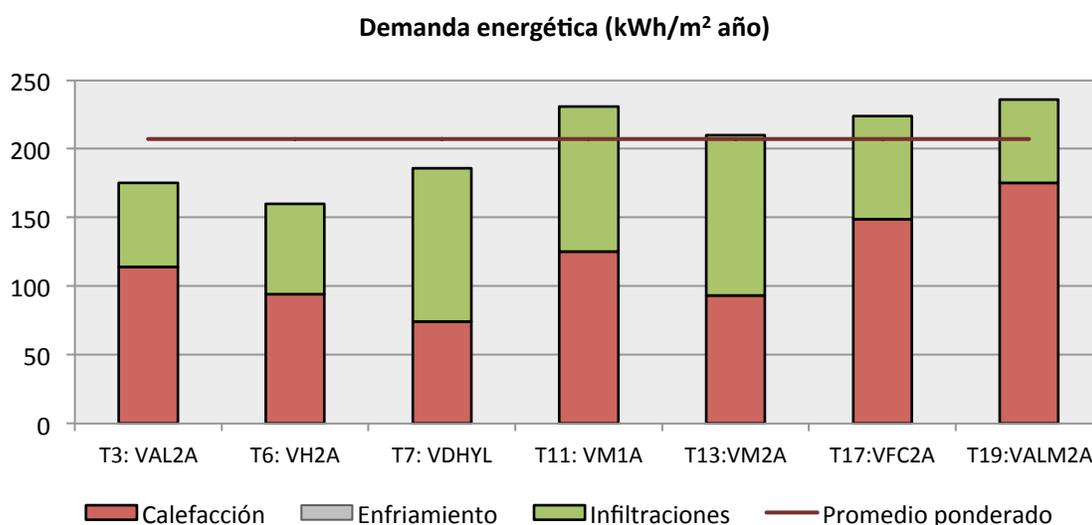


Figura 20: Demanda energética diferenciada para viviendas tipo en Concepción (Fuente: Elaboración propia)

La carga energética asociada a las infiltraciones impacta, como se observa en la Figura 20, de forma distinta según el tipo de construcción. En el caso de albañilería las infiltraciones representan un 29 % de la demanda; en madera, en cambio, representa un 57 %.

6.5 Conclusiones

Con este estudio es posible determinar la línea base de la calidad energética del parque de viviendas construidas el año 2011 en Concepción, como reflejo del estado actual de la técnica y calidad constructiva. En promedio la demanda energética de las viviendas en Concepción es de 207 kWh/m² año. Las viviendas de madera de un piso tienen una demanda promedio de 231 kWh/m² año y las de igual material pero dos pisos un promedio de 210 kWh/m² año. Las viviendas de albañilería de ladrillo combinado con madera tienen una demanda de 236 kWh/m² año, que corresponde a la mayor demanda en la ciudad de estudio.

Es posible observar que existen grandes diferencias entre la demanda calculada con la simplificación de cálculo de un cambio de aire por hora y la demanda calculada considerando la hermeticidad al aire y las variaciones climáticas, lo que podría estar relacionado con el bajo impacto que han tenido las mejoras a la aislación térmica de la envolvente en la demanda energética de las viviendas construidas después de la entrada en vigencia de la Reglamentación térmica.

Por último esta línea base de la calidad energética permite contar con un punto de referencia para otros estudios de demanda energética.

Capítulo 7 Caso de estudio

En este capítulo se evaluó en detalle la demanda energética de dos viviendas que reflejan el construir actual en la ciudad de Concepción mediante simulaciones de demanda energética. Se calculó el impacto de las infiltraciones de aire sobre la demanda energética total, además de distintos escenarios, en que se mejora la hermeticidad al aire de la envolvente y la aislación térmica de muros, ventanas, techo y piso en contacto con el terreno.

Para realizar este trabajo se aplicó una metodología de estudio de casos, las etapas se resumen como;

1. *Selección y definición del caso a estudiar*
2. *Elaboración de preguntas o interrogantes*
3. *Definición de condiciones de borde*
4. *Adquisición de datos*
5. *Análisis e interpretación*

7.1 Selección y Definición de viviendas en estudio.

Para la elección del caso de estudio se consideraron cuatro factores principales.

1. La vivienda, para ser representativa del construir actual, debe ser de una antigüedad máxima de 7 años, es decir construida después de la entrada en vigencia de la segunda parte de la reglamentación térmica en el año 2007 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2006).
2. La materialidad predominante en muros debe representar un porcentaje de las construcciones mayor al 20% de las viviendas construidas en Concepción el año 2011. De la base de datos proporcionada por el INE presentada en Figura 21, se deduce que la materialidad predominante con mayor presencia en la región del Biobío el año 2011 es madera con un 43%, seguido de albañilería de ladrillo combinada con madera en segundo piso con un 24%.

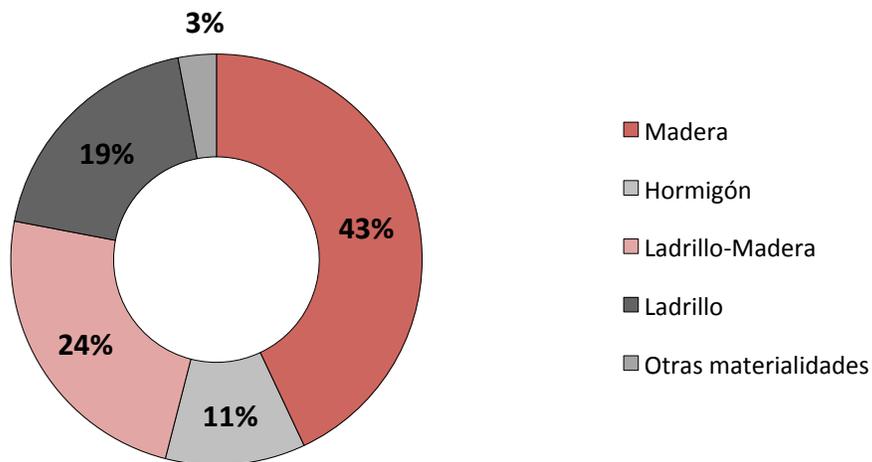


Figura 21: Materiales y sistemas de uso predominante en construcciones de viviendas en la región del Biobío año 2011. (Fuente INE Chile, 2013)

3. El tipo de agrupamiento de la vivienda debe ser representativo. De acuerdo con la información entregada por el INE, para la región del Biobío el año 2011 se construyeron mayoritariamente viviendas de madera y de albañilería de ladrillo combinada con madera aisladas.

4. La cantidad de pisos, debe corresponder con las viviendas más construidas el año 2011. Al revisar las bases de datos consultadas y considerando la materialidad, se observó que la mayor cantidad de viviendas de albañilería de ladrillo combinada con madera fue construida en 2 pisos. En cambio las viviendas de madera fueron construidas, en su mayoría, en un nivel.

Una vez definidas las características físicas y constructivas de las viviendas objeto de estudio, se buscó una vivienda con una hermeticidad al aire dentro de los rangos esperados para la materialidad predominante en muro, de acuerdo a Figura 22.

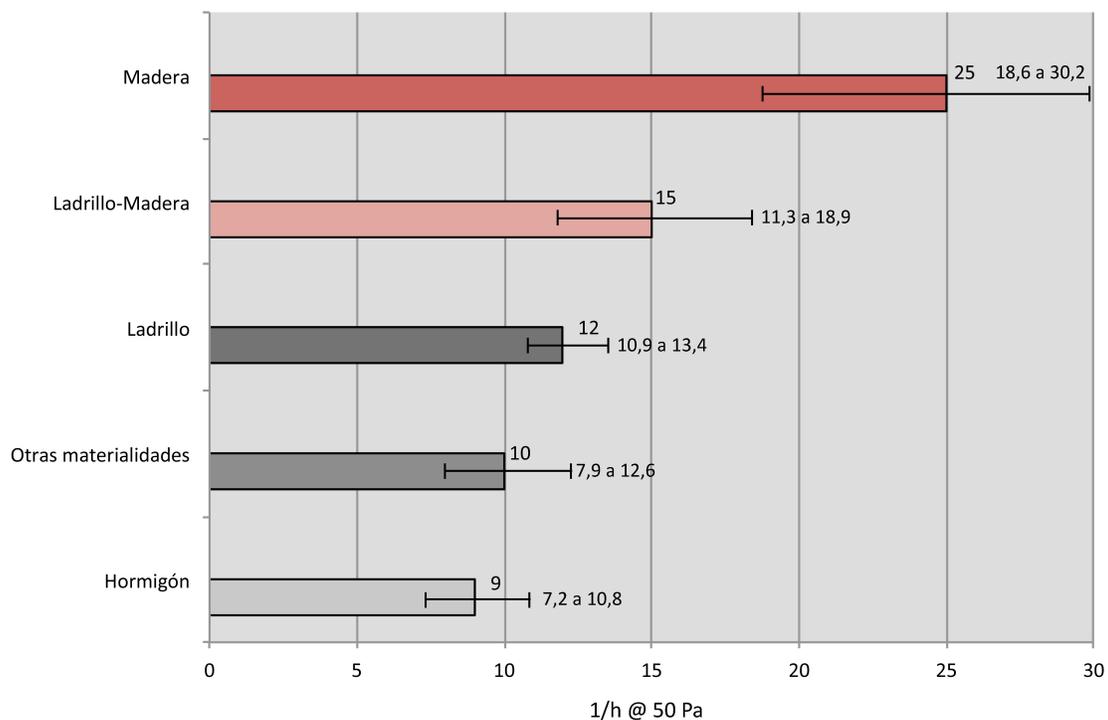


Figura 22: Hermeticidad al aire promedio por materialidad predominante en muros y valores esperados (95% de confianza) (Fuente: Elaboración propia)

El muestreo realizado para dar con las viviendas a evaluar fue de tipo discrecional considerando la disponibilidad de información planimétrica, de ensayos de hermeticidad al aire y la representatividad del caso de estudio. Finalmente se eligió dos viviendas construidas en la ciudad de Concepción, la primera de albañilería de ladrillo combinada con madera, ubicada en una urbanización realizada en varias etapas, que cumple con los factores antes mencionados. El segundo caso de estudio es una vivienda de madera, construida por mandato Serviu como parte de la reconstrucción posterior al terremoto 27-F del 2010.

7.2 Interrogantes

La interrogante principal que responder con este estudio es el impacto que tienen distintos niveles de hermeticidad de la envolvente sobre la demanda energética de una vivienda.

Además se busca conocer como influyen mejoramientos aplicados a la aislación térmica de la envolvente sobre la demanda energética.

Al responder ambas interrogantes se puede comparar el impacto de ambas estrategias sobre la demanda y así evaluar, desde el punto de vista técnico, cuales estrategias de mejoramiento son las más recomendables para el caso en estudio.

Por ultimo se busca evaluar las diferencias entre el estado actual de las dos viviendas estudiadas y como afecta la materialidad a la demanda energética.

7.3 Definición de condiciones de borde

La primera condición definida fue el software a utilizar para las evaluaciones. Se decidió usar el software TAS (Thermal Analysis Software) considerando la disponibilidad de licencias de uso educacional y la disponibilidad de expertos para asesorar el proceso de simulación.

Las condiciones de simulación fueron definidas de modo de aislar los parámetros en estudio. Se definieron medidas que se mantienen iguales para todas las simulaciones, mientras que los parámetros de infiltración y aislación térmica de la envolvente varían, para presentar distintos escenarios.

7.3.1 Software de simulación energética

Las evaluaciones energéticas fueron realizadas utilizando el programa comercial TAS versión 9.2.1.4, herramienta universalmente aceptada para la aplicación. Este programa utiliza un modelo térmico multizona para simular el comportamiento energético y ambiental de un edificio en régimen dinámico, permite además discriminar las cargas térmicas por infiltraciones de aire, por lo que resulta particularmente apropiado para el estudio.

TAS (Thermal Analysis Software) es una herramienta de simulación de modelado dinámico, el cual fue diseñado originalmente en la Universidad de Cranfield y comercializado a partir de 1984. Cumple con la Metodología de Cálculo de Inglaterra y se utiliza normalmente para

simular el comportamiento térmico de edificios nuevos y existentes. El software lo utilizan principalmente ingenieros, arquitectos y académicos. Es una aplicación que se emplea también para el desarrollo de Certificados de Eficiencia Energética (NEP Niveles 3, 4, y 5) y cumple con la norma 2010 L2 (incluida la de 2006 y las metodologías 2010).

TAS es particularmente útil para estudios de sobrecalentamiento, funcionamiento de calefacción y refrigeración. Es también muy apropiado para estudios de evaluación de desempeño ambiental, análisis de ventilación natural, predicción del consumo de energía y análisis de estrategias de diseño. Consta de numerosas validaciones entre ellas ASHRAE 140-1 (2004), ASHRAE 140-1 (2007), EN ISO 13791 y CIBSE TM33.

Este software presenta varios sistemas de cálculo de infiltraciones. En este caso, para tener un mayor control de los datos ingresados se utilizó la opción de infiltración por hora, en que se ingresa el valor de la infiltración normalizada hora a hora para todo el año.

7.3.2 Parámetros fijos

7.3.2.1 Clima

Para las simulaciones se utiliza el archivo climático de Energy Plus, descargado desde <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm> Este tipo de archivos climáticos ha sido evaluados (González & Diaz, 2013) y demostrado su concordancia con datos climáticos locales para Concepción, Chile.

7.3.2.2 Orientación

Se toma la orientación original de la vivienda.

7.3.2.3 Ventilación para calidad del aire

Se establecen horarios de ventilación para las habitaciones y cocina, para días de semana y fin de semana.

Tabla 31: Horario de Ventilación para calidad del aire por recinto

Día	Habitaciones (Horario)	Cocina (Horario)
Semana	8 a 9	12 a 13 y 18 a 19
Fin de semana	10 a 12	12 a 14 y 18 a 20

(Fuente: Elaboración propia)

7.3.2.4 Ventilación para enfriamiento

Se establece un patrón de apertura en función de las temperaturas de aire interior y exterior. La ventana se abre sólo cuando las temperaturas interiores sobrepasan los 25 °C (valor máximo del rango de confort) y la temperatura del aire exterior es menor. La ventana se abre un 50%, considerando que las ventanas son tipo correderas.

7.3.2.5 Superficie vidriada

La superficie vidriada esta dada por la información planimetrica de cada vivienda.

7.3.2.6 Cargas Internas

El programa y cargas de ocupación, los rangos de confort y los periodos de servicio de sistemas de acondicionamiento se definen según las directrices de simulación utilizadas por el programa de certificación del comportamiento térmico para edificios en Chile CCTE v2.0 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2002) y por el Sistema de Calificación Energética de Viviendas MINVU (DITEC Ministerio de Vivienda y Urbanismo & Urbanismo, 2013).

Tabla 32: supuestos de ocupación, rango de confort y temporadas de demanda

Cargas internas	
Carga sensible	Lunes a Viernes: 30,16 Wh/m ² día Sábado y Domingo: 51,6 Wh/m ² día
Carga latente	Lunes a Viernes: 19,04 Wh/m ² día Sábado y Domingo: 32,64 Wh/m ² día
Iluminación	Lunes a Domingo: 39,6 Wh/m ² día
Equipos	Lunes a Domingo: 39,6 Wh/m ² día
Rango de Confort	
Todo el año	20-25 °C
Temporadas de calefacción y enfriamiento	
Temporada de calefacción	Todos los meses con más de 50 grados día ⁷ .
Temporada de enfriamiento	Todos los meses con más de 50 grados día ⁸ .

(Fuente: Elaboración propia)

7.3.3 Parámetros variables

Los parámetros variables se refieren a los que serán modificados para realizar simulaciones de distintos escenarios. Considerando que la investigación se centra en la demanda energética asociada a las infiltraciones de aire y la transmisión de calor a través de la envolvente, se modificarán los parámetros de hermeticidad al aire, transmitancia térmica de la envolvente opaca y transmitancia térmica de la envolvente vidriada.

7.3.3.1 Transmitancia térmica de la envolvente vidriada

Para los elementos vidriados se consideran solo dos escenarios, el primero con vidrio simple y el segundo con doble vidriado hermético considerando los valores en Tabla 33.

⁷ Esta condición se da para todo el año en la ciudad de Concepción

⁸ Esta condición no se da para Concepción, pero de igual forma se considera, para saber si las mejoras propuestas aumentan considerablemente la demanda de enfriamiento.

Tabla 33: Tipos de vidrios

Tipo	Espesor (mm)	Transmitancia térmica Valor U (W/m ² K)	Transmitancia solar	Transmitancia lumínica
Vidrio monolítico	4	5,8	0,82	0,9
DVH	4-6-4	2,8	0,67	0,8

(Fuente: Elaboración propia)

7.3.3.2 Transmitancia térmica de la envolvente opaca

Para los elementos opacos de la envolvente se consideraron cuatro escenarios de mejoramiento para los dos casos de estudio.

Tabla 34: Casos de mejoras a la transmitancia térmica de la envolvente.

Identificación	Mejoras
Caso base	Situación actual
Caso 2	Cambio de vidrio simple por termopanel
Caso 3	Mejora a la transmitancia térmica de la envolvente vertical
Caso 4	Mejora caso 3 + mejora a la transmitancia térmica de piso en contacto con el terreno
Caso 5	Cumple con NTM 011 Mejora caso 4 + mejora envolvente opaca y vidrios termopanel y puertas con aislación térmica.

7.3.3.3 Hermeticidad al aire de la envolvente

Se definen varios niveles de hermeticidad al aire de la envolvente. El primero corresponde al valor medido en obra, es el que será el máximo estudiado. También se realiza una simulación que representa el valor típico utilizado en simulaciones, es decir 1 cambio de aire hora, independiente de las condiciones climáticas y la calidad constructiva del edificio en estudio. Los niveles restantes corresponden a propuestas normativas.

Tabla 35: Valores de hermeticidad utilizados

Referencia	Hermeticidad
Medición mediante Blower Door Test	Según caso de estudio
Valor intermedio ⁹	15
Valor intermedio	10
Requisito propuesto por NTM 011/3	8
Valor límite propuesto por FONDEF D10 I 1025	5
Valor promedio Europeo	3
Valor normalmente utilizado en simulaciones	1*
Requisito estándar Passivaus	0,6

*El valor 1 (1/h) se refiere a una infiltración normalizada anual de 1 cambio de aire hora, mientras que los otros deben ser calculados hora a hora para todo el año.

(Fuente: Elaboración propia)

Es necesario explicitar que los valores 3 (1/h @50 Pa) y 0,6 (1/h @50 Pa) se refieren a los límites propuestos por la normativa alemana (Tuschinski, 2014) y el estándar Passivhaus (Feist, 2011) respectivamente. Lograr ese nivel de hermeticidad al aire exige incluir elementos constructivos que al momento no están generalizados en el mercado local. Por otro lado hay que considerar el nivel de preparación que tienen los carpinteros alemanes en comparación a los chilenos, quienes cuentan con una capacitación formal, equivalente a un título técnico que implica al menos 3 años de estudio. Es por esto que en opinión de la investigadora, proponer valores límite tan bajos, suponen un trabajo a largo plazo que incluya formación técnica de carpinteros, colocar en el mercado materiales adecuados para las prestaciones que aquí se describen.

Para poder ingresar estos valores al programa se decide calcular la infiltración normalizada para cada caso, utilizando la formula de cálculo del Modelo Básico de ASHRAE explicado en detalle en pág. 58.

⁹ Solo se calcula para el caso madera.

$$Q = ELA \sqrt{C_s \Delta t + C_w U^2} \quad \text{Eq. 9}$$

Este modelo permite transformar las mediciones de Blower Door a infiltración normalizada a través de la Ecuación 9 (pág. 60), donde el valor ELA es utilizado como indicador de hermeticidad.

Para el caso base se cuenta con los resultados de Blower Door, pero para los casos siguientes fue necesario calcular el ELA mediante la siguiente ecuación:

$$ELA = C_o \left(\frac{\rho_o}{2}\right)^{0,5} \Delta P_y^{n-0,5} \quad \text{Eq. 15}$$

donde se utiliza el Exponente de flujo ($n=0,51$), correspondiente al ensayo de Blower Door original, en el supuesto de que el flujo mantendrá la geometría del flujo. El coeficiente de flujo es calculado para cada caso utilizando la Eq. 7:

$$Q = C (\Delta P)^n \quad \text{Eq. 7}$$

Este cálculo entrega los valores de infiltración normalizada para las 8760 horas del año, valor que se utilizará para el calculo de la demanda energética.

7.4 Caso de estudio vivienda de albañilería de ladrillo combinada con madera

7.4.1 Descripción de la vivienda

El objeto de estudio corresponde a una vivienda de 72 m² construida en dos niveles, el primero en albañilería de ladrillo hueco y el segundo de entramado de madera ubicada en la ciudad de Concepción. La vivienda fue construida el año 2007 como parte de una urbanización, donde se repite aproximadamente 80 veces la misma vivienda. El arreglo urbano, permite que la vivienda tenga distintas orientaciones respecto del norte y también existen viviendas construidas especularmente. Para este estudio se considera la orientación y distribución planimétrica de la vivienda sometida a evaluación mediante Blower Door.



Figura 23: Fotografía de vivienda de albañilería de ladrillo combinada con madera

La tipología que aquí se presenta tiene alta presencia en la ciudad de Concepción, existiendo múltiples variaciones, pero que mantienen una proporción de ventanas similar. Los materiales utilizados y los sistemas constructivos son muy similares en toda la ciudad.

Como se puede observar en Figura 24 la vivienda cuenta con dos baños completos, un medio baño y tres dormitorios, con living comedor y cocina en primer piso.

El segundo nivel de la vivienda tiene techo inclinado, que baja hasta los 90 cm en los muros longitudinales, configurando un espacio tipo buhardilla. En Figura 25 se presentan las elevaciones de la vivienda.

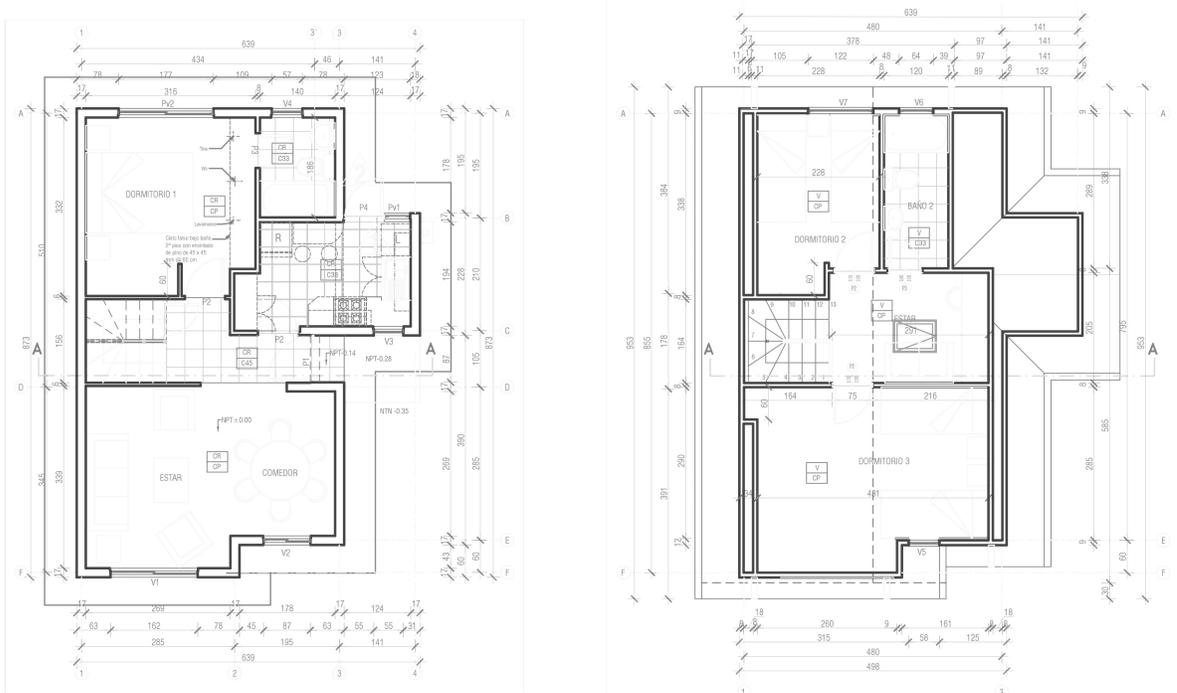


Figura 24: Plantas de primer y segundo piso de vivienda en estudio

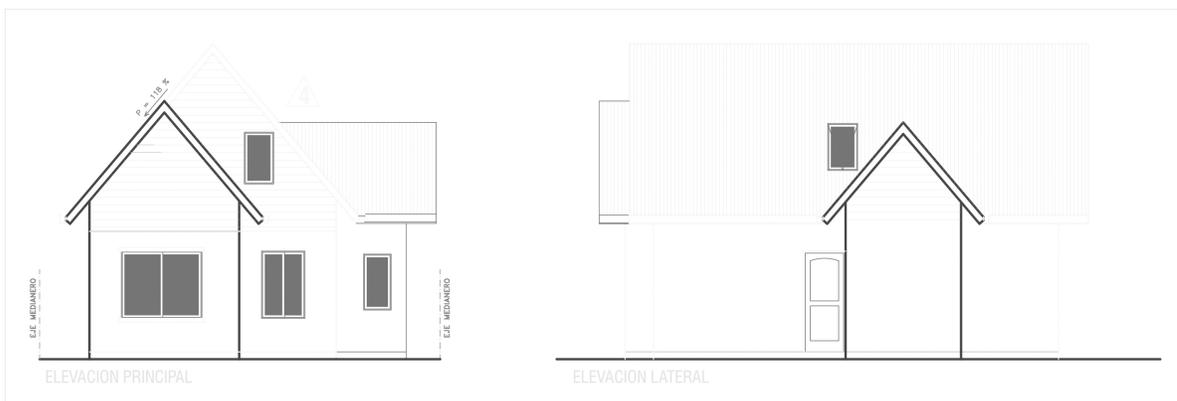


Figura 25: Elevaciones norte y este

7.4.1.1 Orientación

Se toma la orientación original de la vivienda, que es Norte 5 grados. Para esa orientación la habitación principal, dormitorio 2 en segundo piso y baño segundo piso miran al norte y el living comedor y dormitorio tres al sur.

7.4.1.2 Soluciones constructivas

La solución constructiva del caso base, se desprende de las especificaciones técnicas y planos de detalle de la vivienda.

Superficies opacas

En Tabla 36 se describe la composición constructiva de los muros exteriores, la que se detalla en Anexo 2, pág. 153.

Tabla 36: Capas que componen las soluciones constructivas de los elementos opacos la vivienda

Elemento	Materiales (exterior al interior)	Transmitancia térmica Valor U (W/m ² K)
Muro primer piso	<ul style="list-style-type: none"> • Estuco mortero hidrófugo • Ladrillo hueco estructural • Placa yeso cartón 	1,78
Muro segundo piso	<ul style="list-style-type: none"> • Entablado de fibrocemento • Entramado madera pino/ aislación térmica • Placa yeso cartón 	0,51
Cubierta	<ul style="list-style-type: none"> • Plancha Zincaalum • Fieltro • Plancha OSB • Madera pino insigne / lana mineral 	0,39
Cielo	<ul style="list-style-type: none"> • Entramado madera pino/ poliestireno exp. • Placa yeso-cartón 	0,37
Piso en contacto con el terreno	<ul style="list-style-type: none"> • Radier de hormigón 	1,7

(Fuente: Elaboración propia)

Superficies vidriadas

La superficie vidriada de la vivienda es de 10,7 m², según se presenta en Tabla 37. El caso base tiene ventanas de aluminio con vidrio monolítico. El porcentaje de ventanas es bastante bajo (8,9%), considerando que el máximo admisible según normativa actual es de 21% con vidrio monolítico.

Tabla 37: Superficie y orientación de ventanas

Ventana	Orientación	Ancho	Alto	Superficie
Ventana techo	Este	0,80	0,60	0,5
V7	Norte	1,22	1,00	1,2
V6	Norte	0,64	0,51	0,3
V5	Sur	0,55	1,00	0,6
V4	Norte	0,57	0,51	0,3
V3	Sur	0,55	1,12	0,6
V2	Sur	0,87	1,35	1,2
V1	Sur	1,62	1,35	2,2
pV2	Norte	1,74	1,90	3,3
pV1	Norte	0,48	1,12	0,5
Total				10,7
Porcentaje respecto de las fachadas				8,9%

(Fuente: Elaboración propia)

Hermeticidad al aire de la envolvente

La hermeticidad al aire de la vivienda fue medida in-situ con la técnica del Blower Door descrita en 3.3 Test de presurización mediante ventilador, pág. 43, según norma UNE-EN 13829:2002: Aislamiento térmico. Determinación de la estanquidad al aire en edificios. Método de

presurización por medio de ventilador. (ISO 9972:1996, modificada), (AENOR, 2002). Se utilizó esta norma, por que al momento del ensayo no se contaba con normativa nacional¹⁰.

Se realizaron mediciones para el método A definido por la norma, que contempla preparar el edificio cerrando puertas y ventanas, sellando las cañerías de desagüe, y solo cerrando los sistemas de ventilación, cuando estos lo permiten. Este método se asemeja a las condiciones de uso de la vivienda en periodo de calefacción. Se utilizó un segundo método que consiste en sellar sistemas de ventilación y marcos de ventanas para aislar la hermeticidad al aire de la envolvente opaca, este método se denomina método B-modificado.

Para cada método se realizan mediciones para presurización y despresurización, los que posteriormente se promedian, para dar el valor de hermeticidad.

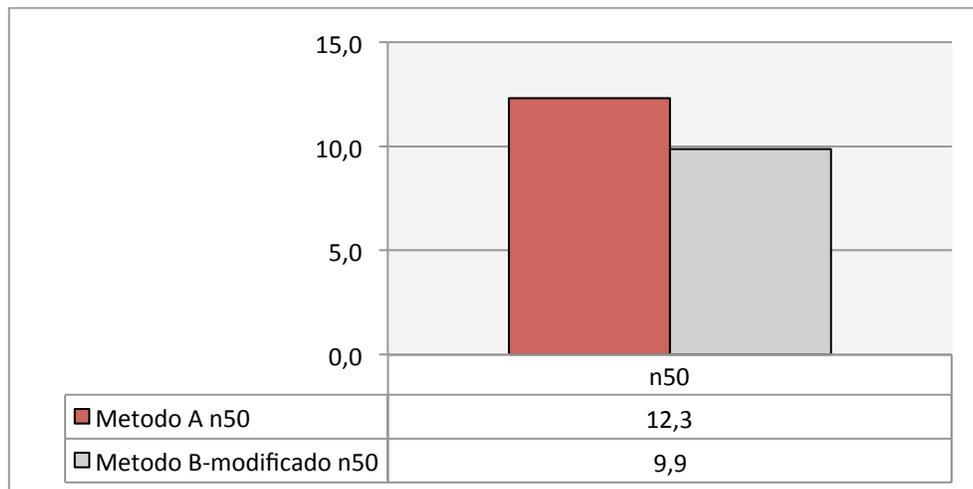


Figura 26: Hermeticidad al aire de vivienda albañilería de ladrillo combinada con madera (Fuente: Elaboración propia)

¹⁰ La norma chilena NCh 3295:2013 Determinación de la tasa de fuga de aire mediante el método de presurización mediante ventilador, fue publicada el 2013, esta norma está basada en ASTM E779-10. Existen pequeñas diferencias entre ambas normas, siendo la mas notoria la definición de métodos de ensayo A y b que se presenta en la norma europea utilizada en este caso.

Como se puede observar en Figura 26 el promedio para el método A (aceptado para el cumplimiento de normativas en Europa) es de 12,3 cambios de aire por hora a 50 Pascales, valor muy cercano a los 12,9 de la línea base. Al sellar marcos de ventanas y elementos de ventilación, se disminuyen 2,4 cambios de aire.

El exponente de flujo n en este caso es de 0,54, lo que significa que el flujo de aire es turbulento (cuando tiende a 0,5), lo que se relaciona con grietas de mayor tamaño (ver 3.3 Test de presurización mediante ventilador, pág. 43,

Al analizar estos datos se puede concluir que gran parte de las infiltraciones se producen por la envolvente opaca de la vivienda, siendo menores las pérdidas por ventanas y sistemas de ventilación.

7.4.2 Mejoras propuestas

7.4.2.1 Aislación térmica de superficies opacas y vidriadas de casos mejorados

En Tabla 38 se presentan los valores de transmitancia térmica para cada caso de estudio.

Tabla 38: Aislación térmica de superficies opacas y vidriadas de casos mejorados

Elemento	Transmitancia térmica, Valor U (W/m^2K)			
	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Muro primer piso	1,83	0,64	1,83	0,55
Muro segundo piso	0,51	0,51	0,51	0,51
Cubierta	0,33	0,33	0,33	0,33
Cielo	0,37	0,37	0,37	0,33
Piso en contacto con el terreno	1,70	1,70	0,80	1,70
Vidrios	2,86	5,70	5,70	2,86
Puertas	2,58	2,58	2,58	0,86

(Fuente: Elaboración propia)

7.4.2.2 Hermeticidad al aire de la envolvente e infiltración normalizada

En Tabla 39 se presentan los promedios mensuales de infiltración normalizada para cada caso de diseño. Se puede observar que el caso base (n50=12,3 1/h) y el caso 2 (n50=10 1/h) presentan una infiltración normalizada promedio mayor a 1 (1/h).

En todos los casos se observa que las mayores infiltraciones se producen en los meses de mayo a julio, es decir que coinciden con el invierno y la época de calefacción. Considerando que son dichos meses cuando se necesita el acondicionamiento del aire exterior, las mayores infiltraciones afectarán la demanda energética al exigir el acondicionamiento de mayores volúmenes de aire.

Tabla 39: Infiltración normalizada mensual

Mes	Velocidad del viento promedio	Temperatura promedio	Infiltración normalizada					
			n50= 12,3 (1/h)	n50= 10 (1/h)	n50= 8 (1/h)	n50= 5 (1/h)	n50= 3 (1/h)	n50= 0,6 (1/h)
Enero	7,93	16,96	1,31	1,06	0,85	0,53	0,32	0,06
Febrero	7,41	16,35	1,25	1,01	0,81	0,51	0,30	0,06
Marzo	6,38	14,52	1,13	0,92	0,73	0,46	0,28	0,06
Abril	5,87	12,11	1,12	0,91	0,73	0,45	0,27	0,05
Mayo	7,92	11,17	1,40	1,13	0,91	0,57	0,34	0,07
Junio	8,03	9,07	1,45	1,18	0,94	0,59	0,35	0,07
Julio	8,96	9,00	1,58	1,28	1,02	0,64	0,38	0,08
Agosto	4,73	9,13	1,06	0,86	0,69	0,43	0,26	0,05
Septiembre	5,86	9,97	1,17	0,95	0,76	0,47	0,28	0,06
Octubre	6,38	11,96	1,19	0,97	0,77	0,48	0,29	0,06
Noviembre	7,41	14,03	1,28	1,04	0,83	0,52	0,31	0,06
Diciembre	7,42	15,99	1,25	1,01	0,81	0,51	0,30	0,06
Promedio anual	7,02	12,5	1,27	1,03	0,82	0,51	0,31	0,06

(Fuente: Elaboración propia)

7.5 Caso de estudio vivienda de entramado en madera

7.5.1 Descripción de la vivienda

El objeto de estudio corresponde a una vivienda de 45,6 m² construida en un nivel de entramado de madera ubicada en la ciudad de Lota en la provincia de Concepción. La vivienda fue construida el año 2010 como parte de la reconstrucción de viviendas en sitio propio impulsada por el MINVU.. Para este estudio se considera la orientación y distribución planimétrica de la vivienda sometida a evaluación mediante Blower Door, que se muestra en Figura 27.



Figura 27: Fotografía de vivienda de entramado en madera

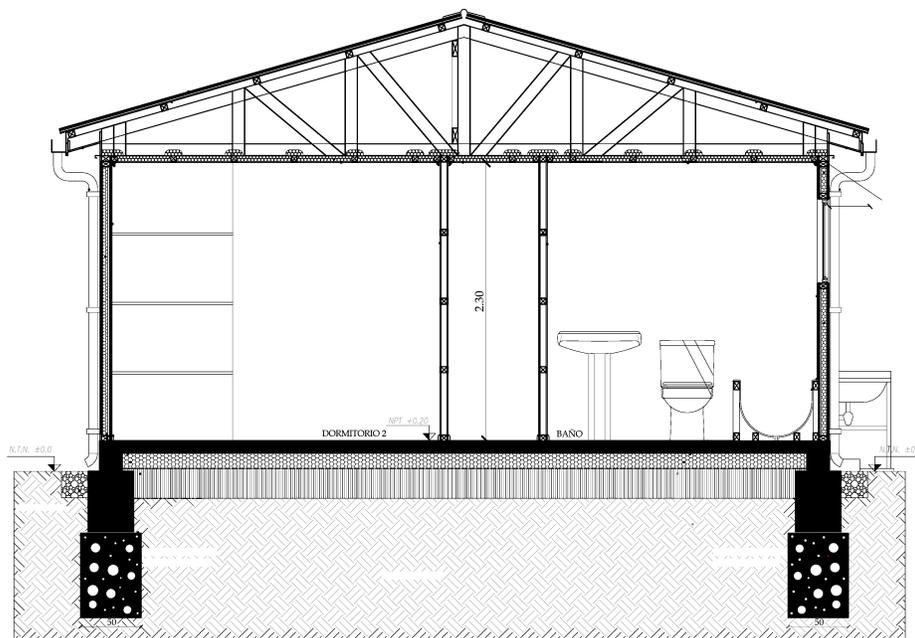
La tipología que aquí se presenta fue desarrollada por el ministerio de vivienda como parte del plan de reconstrucción, para que los damnificados eligieran los modelos de vivienda a construir en su terreno. Los materiales utilizados y los sistemas constructivos utilizados tienen una gran presencia en la región.

Como se puede observar en Figura 28 la vivienda cuenta con un baño completo y tres dormitorios, con living comedor integrado con la cocina.

La vivienda tiene un cielo horizontal aislado, el área de techumbre es ventilada. En Figura 29 se presenta un corte constructivo de la vivienda.



Figura 28: Planta de vivienda en estudio



CORTE CONSTRUCTIVO A-A
ESCALA 1/20

Figura 29: Corte constructivo (fuente: Elaboración propia)

7.5.1.1 Orientación

Se utilizó la orientación original de la vivienda, que es Norte 4 grados. Para esa orientación la cocina y baño miran al norte, mientras que hacia el sur no hay ventanas.

7.5.1.2 Soluciones constructivas

La solución constructiva del caso base, se desprende de las especificaciones técnicas y planos de detalle de la vivienda.

Superficies opacas

En Tabla 40 se describe la composición constructiva de los muros exteriores.

Tabla 40: Capas que componen las soluciones constructivas de los elementos opacos la vivienda

Elemento	Materiales (exterior al interior)	Transmitancia térmica Valor U (W/m ² K)
Muro entramado madera	<ul style="list-style-type: none"> • OSB con revestimiento exterior plástico • Entramado madera pino/ aislación térmica • Terciado ranurado 	0,61
Cubierta	<ul style="list-style-type: none"> • Plancha Zincaalum • Fieltro 	--
Cielo	<ul style="list-style-type: none"> • Entramado madera pino/ lana de vidrio • Placa yeso-cartón 	0,45
Piso en contacto con el terreno	<ul style="list-style-type: none"> • Radier de hormigón 	1,7

(Fuente: Elaboración propia)

Superficies vidriadas

La superficie vidriada de las vivienda es de 10,7 m², según se presenta en Tabla 41. El caso base tiene ventanas de aluminio con vidrio monolítico. El porcentaje de ventanas es bastante bajo (5,8%), considerando que el máximo admisible según normativa actual es de 21% con vidrio monolítico.

Tabla 41: Superficie y orientación de ventanas

Ventana	Orientación	Ancho	Alto	Superficie
V1	oeste	1,30	1,50	1,95
V2	Este / oeste	1,00	1,00	1,00
V3	norte	0,55	1,00	0,55
V4	norte	0,55	1,00	0,55
Total				4,05
Porcentaje respecto de las fachadas				5,8%

(Fuente: Elaboración propia)

Hermeticidad al aire de la envolvente

La hermeticidad al aire de la vivienda fue medida in-situ con la técnica del Blower Door descrita en 3.3 Test de presurización mediante ventilador, pág. 43, según norma UNE-EN 13829:2002: Aislamiento térmico. Determinación de la estanquidad al aire en edificios. Método de presurización por medio de ventilador. (ISO 9972:1996, modificada), (AENOR, 2002). Se utilizó esta norma, por que al momento del ensayo no se contaba con normativa nacional¹¹.

Se realizaron mediciones para el método A definido por la norma, que contempla preparar el edificio cerrando puertas y ventanas, sellando las cañerías de desagüe, y solo cerrando los sistemas de ventilación, cuando estos lo permiten. Este método se asemeja a las condiciones de uso de la vivienda en periodo de calefacción. Se utilizó un segundo método que consiste en sellar sistemas de ventilación y marcos de ventanas para aislar la hermeticidad al aire de la envolvente opaca, este método se denomina método B-modificado.

¹¹ La norma chilena NCh 3295:2013 Determinación de la tasa de fuga de aire mediante el método de presurización mediante ventilador, fue publicada el 2013, esta norma está basada en ASTM E779-10. Existen pequeñas diferencias entre ambas normas, siendo la mas notoria la definición de métodos de ensayo A y b que se presenta en la norma europea utilizada en este caso.

Para cada método se realizan mediciones para presurización y despresurización, los que posteriormente se promedian, para dar el valor de hermeticidad.

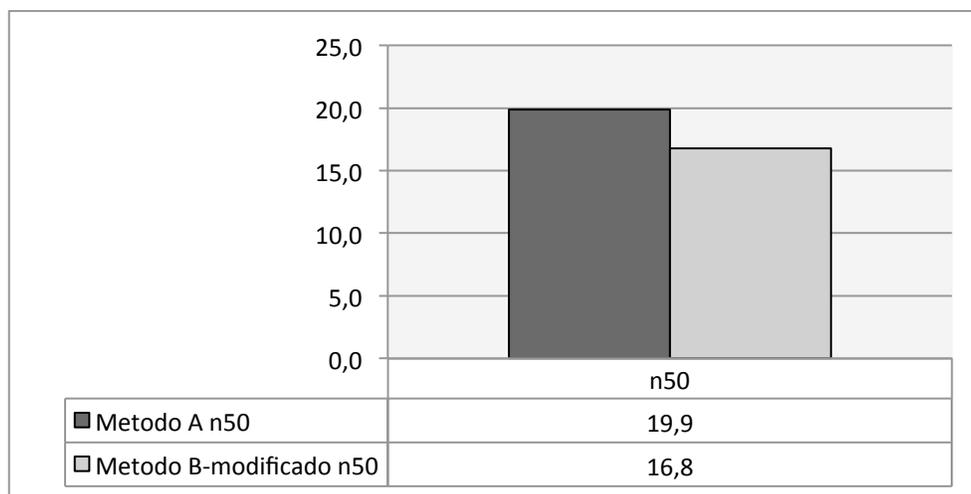


Figura 30: Hermeticidad al aire de vivienda de entramado de madera

Como se puede observar en Figura 30 el promedio para el método A (aceptado para el cumplimiento de normativas en Europa) es de 19,9 cambios de aire por hora a 50 Pascales, valor menor a los 24 cambios de aire hora de la línea base, pero que se encuentra dentro de los valores esperados para la materialidad madera. Al sellar marcos de ventanas y elementos de ventilación, se disminuyen 3,1 cambios de aire.

El exponente de flujo n en este caso es de 0,56, lo que significa que el flujo de aire es turbulento (cuando tiende a 0,5), lo que se relaciona con grietas de mayor tamaño (ver 3.3 Test de presurización mediante ventilador, pág. 43)

Al analizar estos datos se puede concluir que gran parte de las infiltraciones se producen por la envolvente opaca de la vivienda, donde solo un 15,6% de la permeabilidad al aire se relaciona con las ventanas y sistemas de ventilación.

7.5.2 Mejoras propuestas

7.5.2.1 Aislación térmica de superficies opacas y vidriadas de casos mejorados

En Tabla 42 se presentan los valores de transmitancia térmica para cada caso de estudio, en Anexos

Anexo 1, se detalla la composición constructiva de cada caso.

Tabla 42: Aislación térmica de superficies opacas y vidriadas de casos mejorados

Elemento	Transmitancia térmica, Valor U (W/m^2K)			
	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Muro exterior	0,61	0,51	0,51	0,34
Cubierta	--	--	--	--
Cielo	0,41	0,37	0,37	0,29
Piso en contacto con el terreno	1,70	1,70	0,80	0,80
Vidrios	2,86	5,70	5,70	2,86
Puertas	2,58	2,58	2,58	0,86

(Fuente: Elaboración propia)

7.5.2.2 Hermeticidad al aire de la envolvente e infiltración normalizada

En Tabla 43 se presentan los promedios mensuales de infiltración normalizada para cada caso de diseño. Se puede observar que el caso base ($n_{50}=19,9$ 1/h), el caso 2 ($n_{50}=15$ 1/h) y el caso 3 presentan una infiltración normalizada promedio mayor a 1 (1/h).

En todos los casos se observa que las mayores infiltraciones se producen en los meses de mayo a julio, es decir que coinciden con el invierno y la época de calefacción. Considerando que son dichos meses cuando se necesita el acondicionamiento del aire exterior, las mayores infiltraciones afectarán la demanda energética al exigir el acondicionamiento de mayores volúmenes de aire.

Tabla 43: Infiltración normalizada mensual

Mes	Velocidad del viento promedio	Temperatura promedio	Infiltración normalizada						
			n50= 19,9 (1/h)	n50= 15 (1/h)	n50= 10 (1/h)	n50= 8 (1/h)	n50= 5 (1/h)	n50= 3 (1/h)	n50= 0,6 (1/h)
Enero	7,93	16,96	1,99	1,50	1,00	0,80	0,50	0,30	0,06
Febrero	7,41	16,35	1,89	1,43	0,95	0,76	0,48	0,29	0,06
Marzo	6,38	14,52	1,72	1,29	0,86	0,69	0,43	0,26	0,06
Abril	5,87	12,11	1,70	1,28	0,85	0,68	0,43	0,26	0,05
Mayo	7,92	11,17	2,12	1,60	1,07	0,85	0,53	0,32	0,07
Junio	8,03	9,07	2,20	1,66	1,11	0,88	0,55	0,33	0,07
Julio	8,96	9,00	2,40	1,81	1,20	0,96	0,60	0,36	0,08
Agosto	4,73	9,13	1,61	1,21	0,81	0,65	0,40	0,24	0,05
Septiembre	5,86	9,97	1,77	1,33	0,89	0,71	0,44	0,27	0,06
Octubre	6,38	11,96	1,81	1,36	0,91	0,73	0,45	0,27	0,06
Noviembre	7,41	14,03	1,94	1,46	0,97	0,78	0,49	0,29	0,06
Diciembre	7,42	15,99	1,90	1,43	0,95	0,76	0,48	0,29	0,06
Promedio anual	7,02	12,5	1,92	1,45	0,96	0,77	0,48	0,29	0,06

(Fuente: Elaboración propia)

7.6 Análisis de Resultados de simulaciones

7.6.1 Vivienda de albañilería de ladrillo combinada con madera

Los resultados de las simulaciones permiten diferenciar las demandas por calefacción y enfriamiento, al mismo tiempo que permiten conocer las ganancias solares, por ocupación, por iluminación artificial y por equipos, además de las pérdidas por conducción en elementos opacos, conducción en elementos translúcidos, ventilación e infiltración. Todos estos datos permiten evaluar el balance energético interior de la vivienda en estudio.

7.6.1.1 Caso Base vivienda albañilería de ladrillo combinada con madera

El caso base se entiende como la vivienda existente, considerando sus materiales constructivos según especificaciones técnicas y la hermeticidad al aire medida con Blower Door Test.

Otro análisis interesante en este caso es comparar la demanda energética de la vivienda tipo con los valores de demanda que se hubieran calculado de usar el supuesto de 1 cambio de aire hora fijo por infiltración. Como se observa en Figura 31, la diferencia de demanda calculada es de 26 kWh/m² año, que corresponde a un 13 %. Considerando que este caso presenta una hermeticidad de 12,3 (1/h) que corresponde, aproximadamente, al promedio de su categoría (12,4 (1/h)) y al promedio nacional 12,9 (1/h).

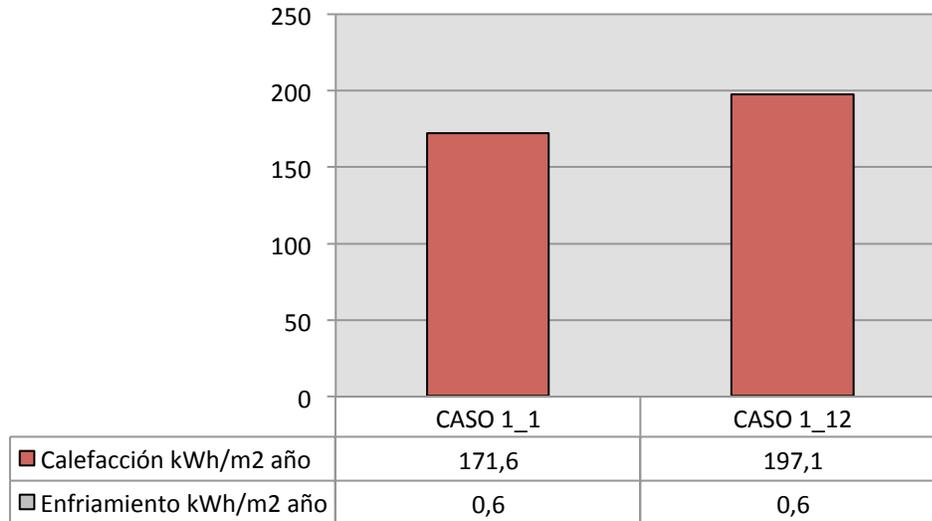


Figura 31: Demanda energética para caso Base con infiltración normalizada y valor normalmente utilizado en simulaciones. (Fuente: Elaboración propia)

7.6.1.2 Mejoras a la aislación térmica y hermeticidad al aire de la envolvente de vivienda albañilería de ladrillo combinada con madera

Como ya se mencionó con anterioridad, se definieron cinco casos de mejora a la demanda energética de la envolvente, en Figura 32 se presentan los resultados de demanda para los cinco casos con infiltración normalizada correspondiente a 12,3 (1/h). Como se puede observar, al mejorar la aislación térmica de la envolvente es posible llegar a una demanda mínima de 144 kWh/m² año, mejorando un 26 % respecto del caso base.

Si se compara la demanda calculada con 1 cambio de aire por hora con el caso base, se observa que el error que se comete al minimizar las infiltraciones tiene un impacto mayor sobre la demanda que el cambio de ventanas propuesto en el CASO 2 (disminuye 14 kWh/m² año) y similar al mejoramiento con EIFS de 4 cm en primer nivel propuesto en CASO 3 (disminuye 29 kWh/m² año).

Respecto de las demandas de refrigeración, se puede observar que estas no se ven afectadas mayormente por las mejoras aplicadas a la envolvente, lo que está relacionado con el clima de la ciudad de Concepción.

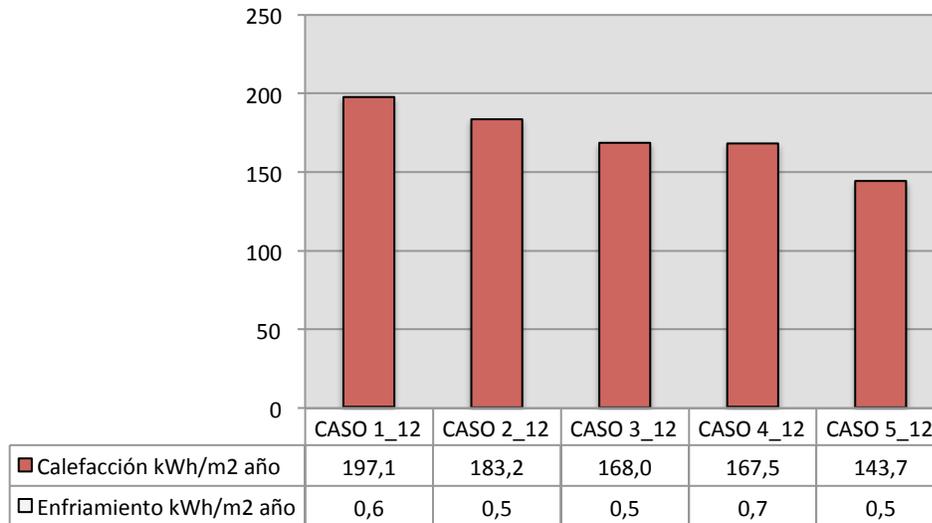


Figura 32: Demanda energética para los cinco escenarios de mejora a la aislación térmica de la envolvente con hermeticidad medida en vivienda de 12,3 (1/h) (Fuente: Elaboración propia)

En Figura 33 se presentan las demandas energéticas totales de las 30 simulaciones realizadas con valores de infiltración normalizada calculados hora a hora. Se puede observar que la curva es paralela para todos los casos, lo que significa que la disminución de la demanda energética asociada a las infiltraciones es independiente de la aislación térmica de la envolvente.

Esto está relacionado con la baja demanda energética asociada a la ventilación y con que el set asignado a las ventanas que fue definido como “abrir ventanas cuando la temperatura interior sea mayor que 25 °C, siempre que la temperatura exterior sea menor que la interior”. Es de suponer que en climas con necesidad de refrigeración la demanda energética para enfriamiento aumente al disminuir las infiltraciones.

También se observa que la mayor diferencia, en términos de demanda se produce al disminuir de 12 a 10 cambios de aire por hora @50 Pa y que al disminuir la permeabilidad la brecha entre las demandas se acorta.

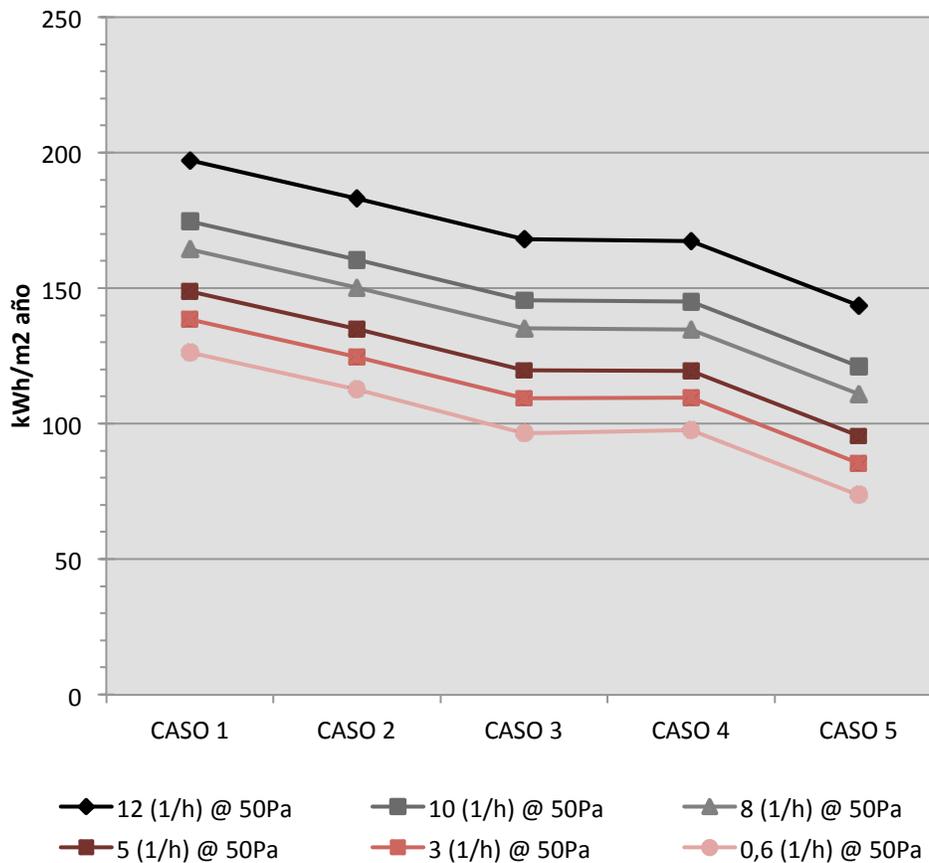


Figura 33: Demanda energética total para cada caso simulado. Según caso y hermeticidad de la envolvente. (Fuente: Elaboración propia)

Se destaca que sólo mejorando la envolvente (puntos 12 (1/h @ 50 Pa) en Figura 33) se llega a una demanda de 144 (kWh/m² año), lo que significa una disminución de la demanda de 53 (kWh/m² año). Si sólo se mejorara la hermeticidad al aire de la envolvente hasta dar cumplimiento a las recomendaciones del Manual de Hermeticidad al aire de Edificaciones, logrando a una hermeticidad de 5 (1/h @50 Pa), es posible una disminución de la demanda de 48 (kWh/m² año), que representa un 24% de la demanda.

Como se observa en Figura 33, una demanda energética de aproximadamente 145 (kWh/m² año) puede lograr aplicando la mejora CASO 4: aislación térmica bajo radier, con 8 (1/h @50 Pa), CASO 3: EIFS: 40 mm sobre muro albañilería con 8 (1/h @50 Pa) o CASO 2: ventanas termopanel, con 5 (1/h @50 Pa). En este gráfico se marcan los valores del cálculo de demanda sin infiltración (diamantes), para mostrar la demanda mínima hipotética.

Si se comparan estos valores con los valores de referencia presentados por Bobadilla (2014) en su tesis doctoral, sólo cuatro casos logran una demanda menor a los 99 kWh/m² año. Este valor se puede lograr aplicando tres estrategias:

1. Con pequeñas mejoras a la envolvente; CASO 3: EIFS 40 mm sobre muro albañilería y una vivienda muy hermética; 0,6 (1/h @50 Pa).
2. Con cambios a la forma de construir y aislar el radier; CASO 4: aislación térmica bajo radier y una vivienda muy hermética; 0,6 (1/h @50 Pa).
3. Mejorando muros en primer piso, aislación térmica de pisos, colocando ventanas DVH, con niveles de hermeticidad más razonables de 3 o 5 (1/h @50 Pa).

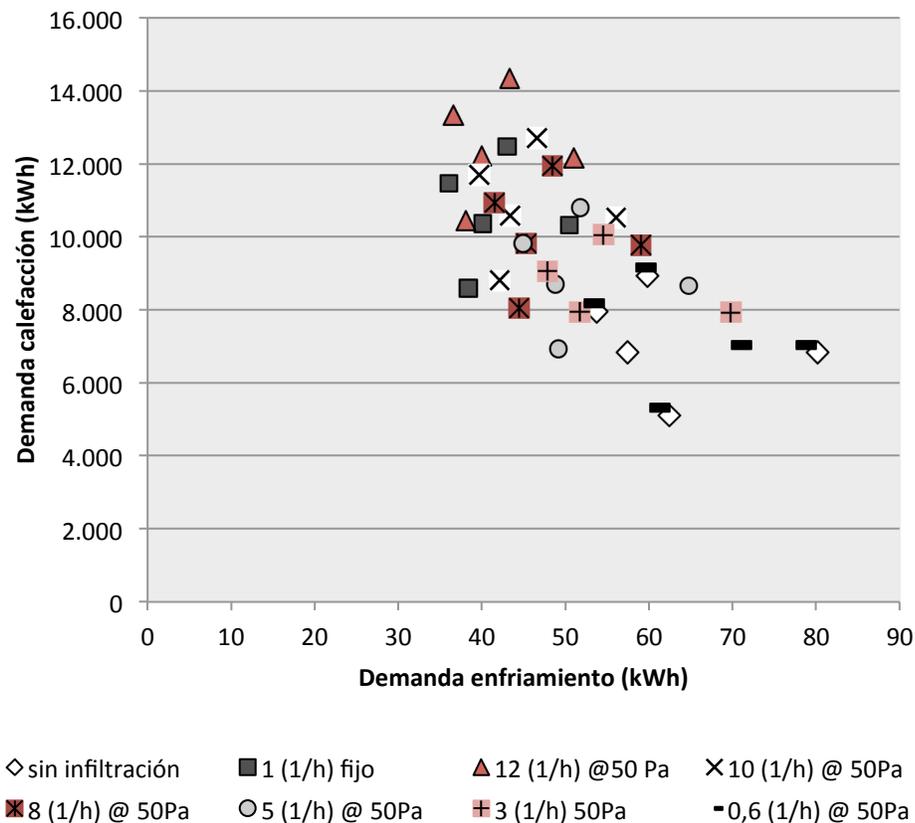


Figura 34: Demanda de calefacción v/s enfriamiento para todos los casos simulados.

7.6.1.3 Balance energético de vivienda de albañilería de ladrillo combinada con madera

En esta sección se muestra y analiza el balance energético de la vivienda, considerando como limite la envolvente térmica y como indicador la demanda energética.

En Tabla 34 se presenta diagrama Sankey de demanda energética de la vivienda tipo para todo el año. Como se puede observar, la demanda de calefacción es preponderante, mientras que la demanda por calefacción se considera marginal. De la demanda teórica total un 35 % es cubierto por las ganancias internas, por otro lado las pérdidas por infiltración corresponden al mismo porcentaje, representando 106 kWh/m²año.

Para este caso en particular, y para ejemplificar la relevancia del fenómeno de las infiltraciones, se podría decir que la vivienda está perdiendo, anualmente, por infiltraciones toda la energía que capta del sol, los ocupantes, equipos y sistemas de iluminación.

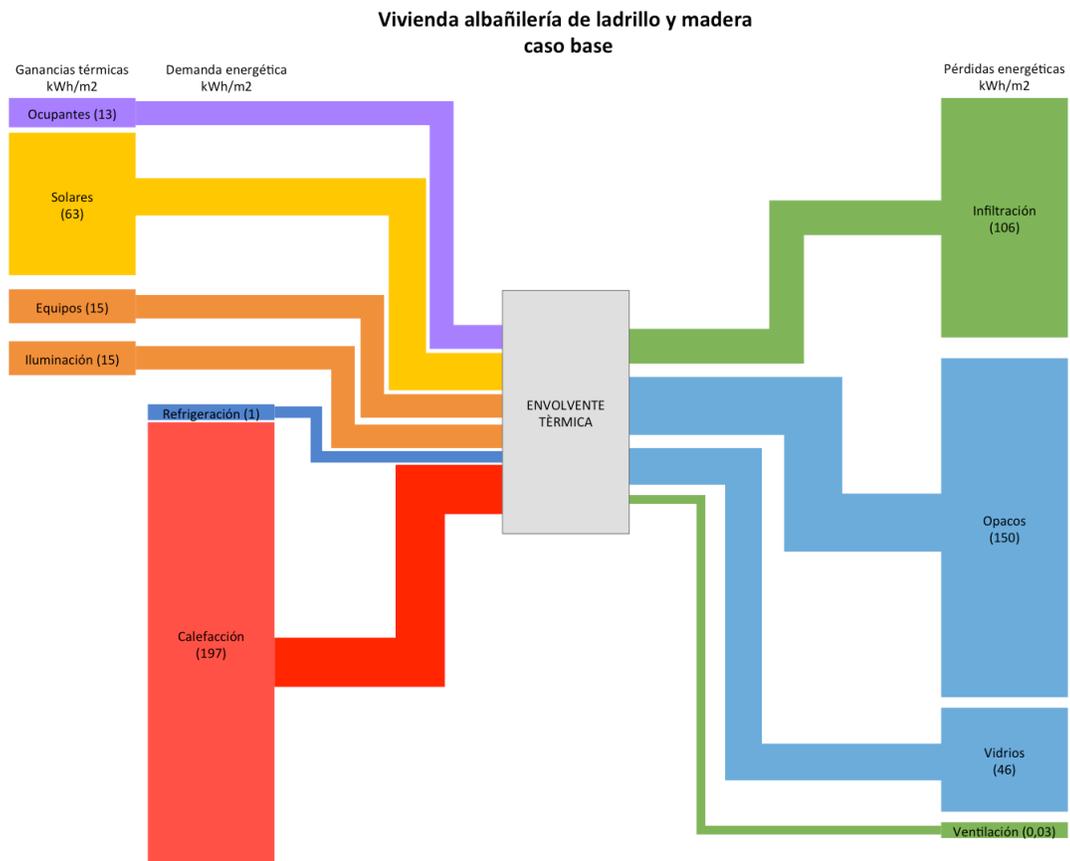


Figura 35: Diagrama Sankey caso base vivienda albañilería de ladrillo y madera (Fuente: Elaboración propia). En Anexo 4, pág. 161 se encuentra versión de mayor tamaño.

Como se observa en Figura 34 las demandas por enfriamiento para la ciudad de Concepción son muy menores, llegando a un máximo de 80 kWh, al mejorar la hermeticidad al aire se produce un leve aumento en la demanda energética para calefacción. Como ya se comentó anteriormente, el aumento podría ser mayor, de no considerar la apertura de ventanas como estrategia de enfriamiento.

En Figura 36 se muestra el diagrama de Sankey de la vivienda mejorada caso 5 con 8 cambios de aire hora, en líneas entrecortadas se puede observar proyección del caso base.

Este diagrama permite observar como se reduce la demanda energética de calefacción, al mejorar la hermeticidad al aire y la aislación térmica de elementos opacos y transparentes.

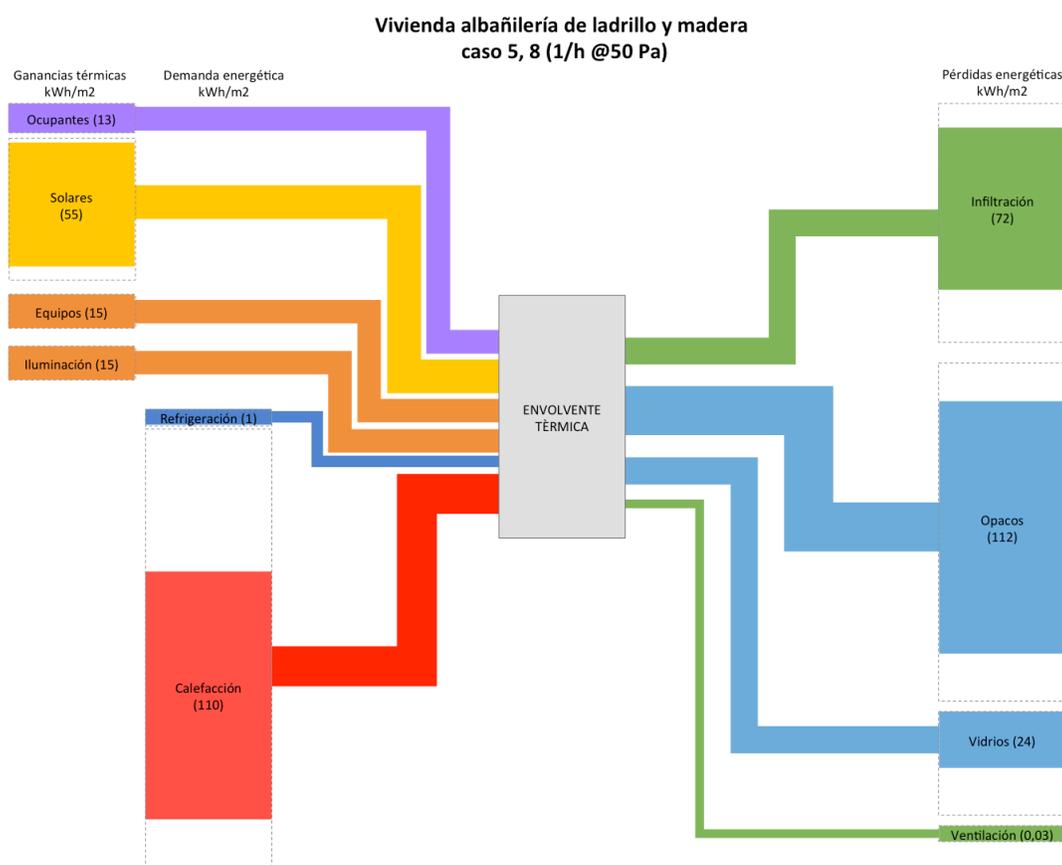


Figura 36: Diagrama Sankey caso 5_8 vivienda albañilería de ladrillo y madera que cumple con NTM 011. En Anexo 5, pág. 162 se encuentra versión de mayor tamaño.

La disminución de demanda es muy similar al disminuir las infiltraciones (34 kWh/m^2 año) y al mejorar la aislación térmica de la envolvente (38 kWh/m^2 año). Cambiar vidrios simples por vidrios de mejor calidad permite disminuir en 22 kWh/m^2 año las pérdidas. A pesar de que esto afecta a las ganancias solares en 8 kWh/m^2 año, el balance final es positivo, aunque no tan significativo como las mejoras a la hermeticidad y aislación térmica de elementos opacos.

Al comparar estos resultados con el valor límite de demanda de 99 kWh/m^2 año propuesto por Bobadilla (2014), se observa que es necesario disminuir aún más las infiltraciones. Considerando la misma configuración de la envolvente, pero con una hermeticidad al aire de 5 (1/h) @ 50Pa la demanda baja a 95 kWh/m^2 año.

Si se comparan los resultados para este caso, con las exigencias propuestas por Sherman (1986a) de 159 MJ/m^2 año y la metodología para el cálculo de los valores límite de hermeticidad al aire propuesta por el proyecto FONDEF D10 I 1025, que estiman en valor máximo de demanda en 40 kWh/m^2 año por infiltración, este caso no cumple con los requisitos.

7.6.2 Vivienda de entramado en madera

Los resultados de las simulaciones permiten diferenciar las demandas por calefacción y enfriamiento, al mismo tiempo que permiten conocer las ganancias solares, por ocupación, por iluminación artificial y por equipos, además de las pérdidas por conducción en elementos opacos, conducción en elementos translúcidos, ventilación e infiltración. Todos estos datos permiten evaluar el balance energético interior de la vivienda en estudio.

7.6.2.1 Caso Base vivienda entramado de madera

El caso base se entiende como la vivienda existente, considerando sus materiales y sistemas constructivos según especificaciones técnicas y la hermeticidad al aire medida con Blower Door Test.

El primer análisis que se presenta, es la comparación entre el caso base y la simplificación de cálculo de 1 (1/h), que como se comentó con anterioridad ha sido utilizada, hasta el momento, para los cálculos de demanda. La diferencia de demanda de calefacción entre el caso base y el cálculo realizado un cambio de aire hora fijo es de 46 kWh/m², en Figura 37 se grafican las demandas tanto para calefacción como para refrigeración.

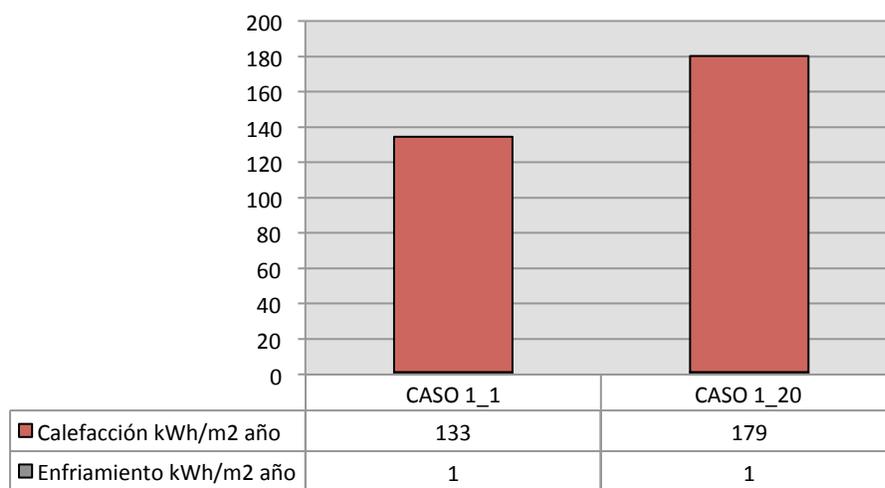


Figura 37: Demanda energética para caso Base con infiltración normalizada y valor normalmente utilizado en simulaciones. (Fuente: Elaboración propia)

7.6.2.2 Mejoras a la aislación térmica y hermeticidad al aire de la envolvente vivienda entramado de madera

En Figura 38 se presentan los resultados de demanda energética para los cinco casos de mejora a la envolvente térmica, manteniendo la hermeticidad al aire del caso base que es de 20 (1/h). Como se puede observar, al mejorar la aislación térmica es posible llegar a una demanda mínima de 128 kWh/m² año.

Comparando la demanda calculada con 1 cambio de aire por hora con el caso base, se observa que el error que se comete al minimizar las infiltraciones tiene un impacto mayor sobre la demanda que las mejoras 2 a 4. Solo aplicando las mejoras descritas para el caso 5 (Tabla 38, pág. 115) es posible una mayor disminución a la diferencia entre considerar o no la hermeticidad al aire.

Esto significa que el cambio de vidrios por termopanel (Caso 2), aumentar la aislación térmica al incluir un panel de yeso cartón aislado (Caso 3), o aislar el radier (Caso 4) no lograrían contrarrestar el efecto de las infiltraciones sobre la demanda. Solo una estrategia de aislación térmica de la envolvente combinada (Caso 5) lograría contrarrestar el error de calculo inducido por la simplificación de cálculo.

Respecto de las demandas de refrigeración, se puede observar que estas no se ven afectadas mayormente por las mejoras aplicadas a la envolvente, lo que está relacionado con el clima de la ciudad de Concepción.

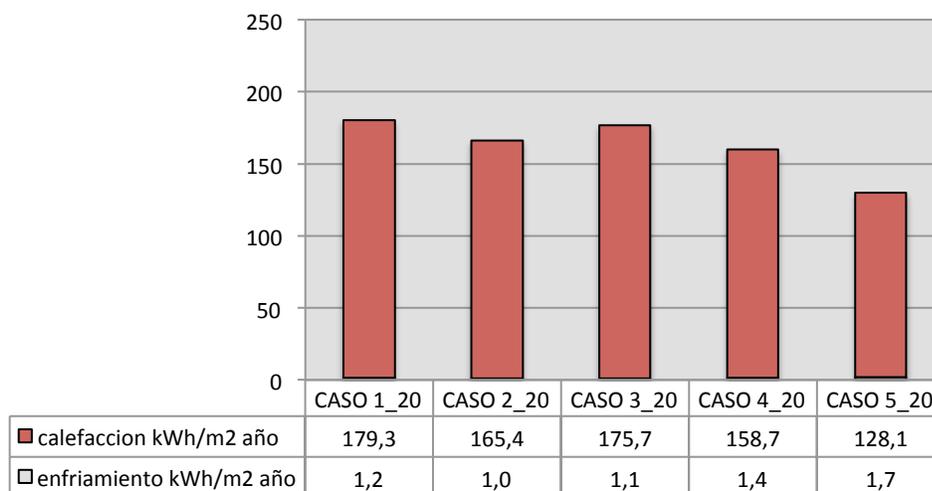


Figura 38: Demanda energética para los cinco escenarios de mejora a la aislación térmica de la envolvente con hermeticidad medida en vivienda de 20 (1/h) (Fuente: Elaboración propia)

En Figura 39 más adelante, se presentan la demandas energéticas totales de las 35 simulaciones realizadas con valores de infiltración normalizada calculados hora a hora. Se puede observar que la curva es paralela para todos los casos, lo que significa que la disminución de la demanda energética asociada a las infiltraciones es independiente de la aislación térmica de la envolvente. Este fenómeno está también relacionado con la baja demanda energética asociada a la ventilación (que se relaciona con el clima templado marítimo de Concepción) y con que el set asignado a las ventanas que fue definido como “abrir ventanas cuando la temperatura interior sea mayor que 25 °C, siempre que la temperatura exterior sea menor que la interior”. Es de suponer que en climas más cálidos, con necesidad de refrigeración, la demanda energética para enfriamiento aumente al disminuir las infiltraciones.

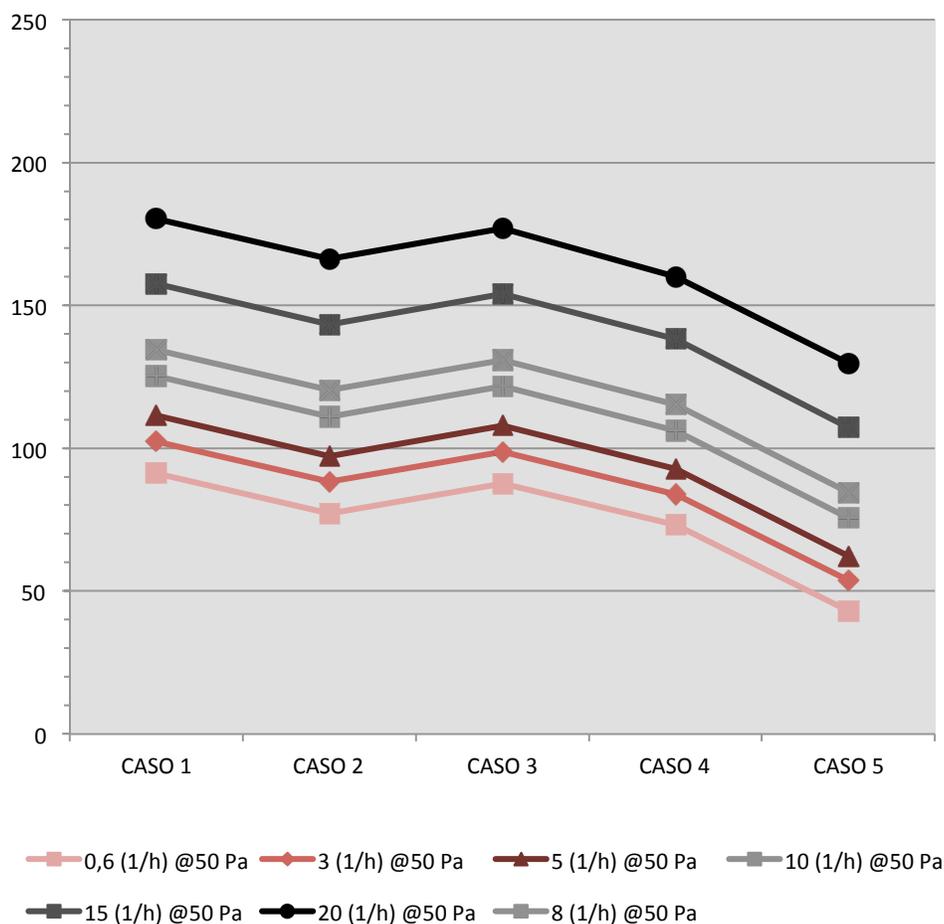


Figura 39: Demanda energética total para cada caso simulado. Según caso y hermeticidad de la envolvente. (Fuente: Elaboración propia)

Las diferencias entre las demandas totales, tienden a $1 \text{ (1/h)} = 4,6 \text{ kWh/m}^2$, al comparar la demanda para cada caso, según el nivel de hermeticidad, para este caso de estudio.

Se destaca que sólo mejorando la envolvente (puntos 12 (1/h @50 Pa) en Figura 33) se llega a una demanda de $130 \text{ (kWh/m}^2 \text{ año)}$, lo que significa una disminución de la demanda de $50 \text{ (kWh/m}^2 \text{ año)}$. Si sólo se mejorara la hermeticidad al aire de la envolvente hasta dar cumplimiento a las recomendaciones del Manual de Hermeticidad al aire de Edificaciones, llegando a una hermeticidad de 5 (1/h @50 Pa) , es se logra una demanda de $111 \text{ (kWh/m}^2 \text{ año)}$, que es menor a la lograda al mejorar la aislación térmica de la envolvente manteniendo los niveles de hermeticidad y representa una disminución del 38%.

Al comparar los valores de demanda presentados en la Figura 39 con los valores de referencia presentados por Bobadilla (2014) en su tesis doctoral, quince casos logran una demanda menor a los 99 kWh/m² año. Este valor se puede lograr aplicando las siguientes estrategias:

1. Hermeticidad al aire mejorada, con valores bajo los 3 (1/h @ 50 Pa).
2. Con mejoras a la aislación térmica según Caso 5 y hermeticidad al aire menor a aproximadamente 12 (1/h @50 Pa).
3. Con hermeticidad al aire de 5 (1/h @50 Pa) y mejoras de acuerdo a Caso 2 y Caso 4.

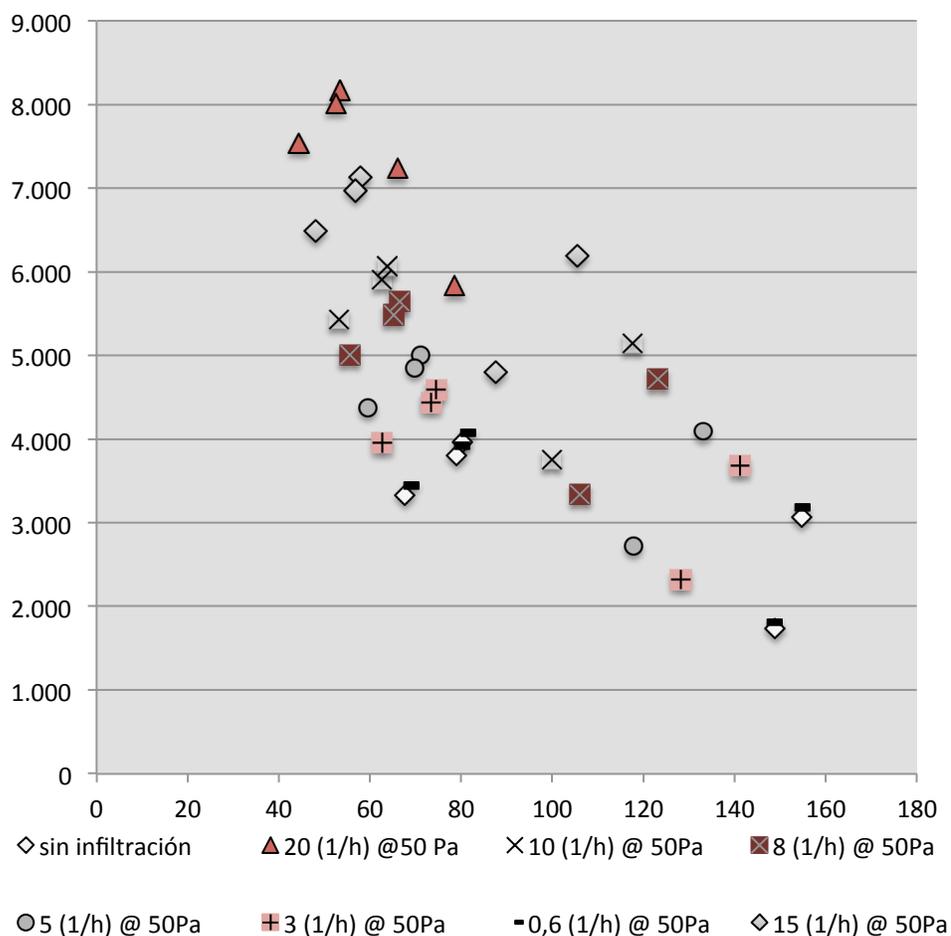


Figura 40: Demanda de calefacción v/s enfriamiento para todos los casos simulados.

7.6.2.3 Balance energético de vivienda entramado en madera

En esta sección se muestra y analiza el balance energético de la vivienda, considerando como límite la envolvente térmica y como indicador la demanda energética. Para esto se utilizan diagramas Sankey, los que mediante cajas que representan cada ganancia, demanda o pérdida a través de la envolvente. El tamaño de cada caja representa los valores de energía por metro cuadrado de superficie por año. La proporción del alto de estas cajas, permite visualizar como influye cada factor en el balance energético de la vivienda. El diagrama Sankey de la Figura 41, muestra el balance energético de la vivienda, considerando la envolvente tal como fue construida y la hermeticidad al aire medida mediante ensayo de Blower Door.

Como se observa en Figura 41 la demanda para calefacción predomina para este caso, mientras que la demanda para enfriamiento es, comparativamente, muy menor.

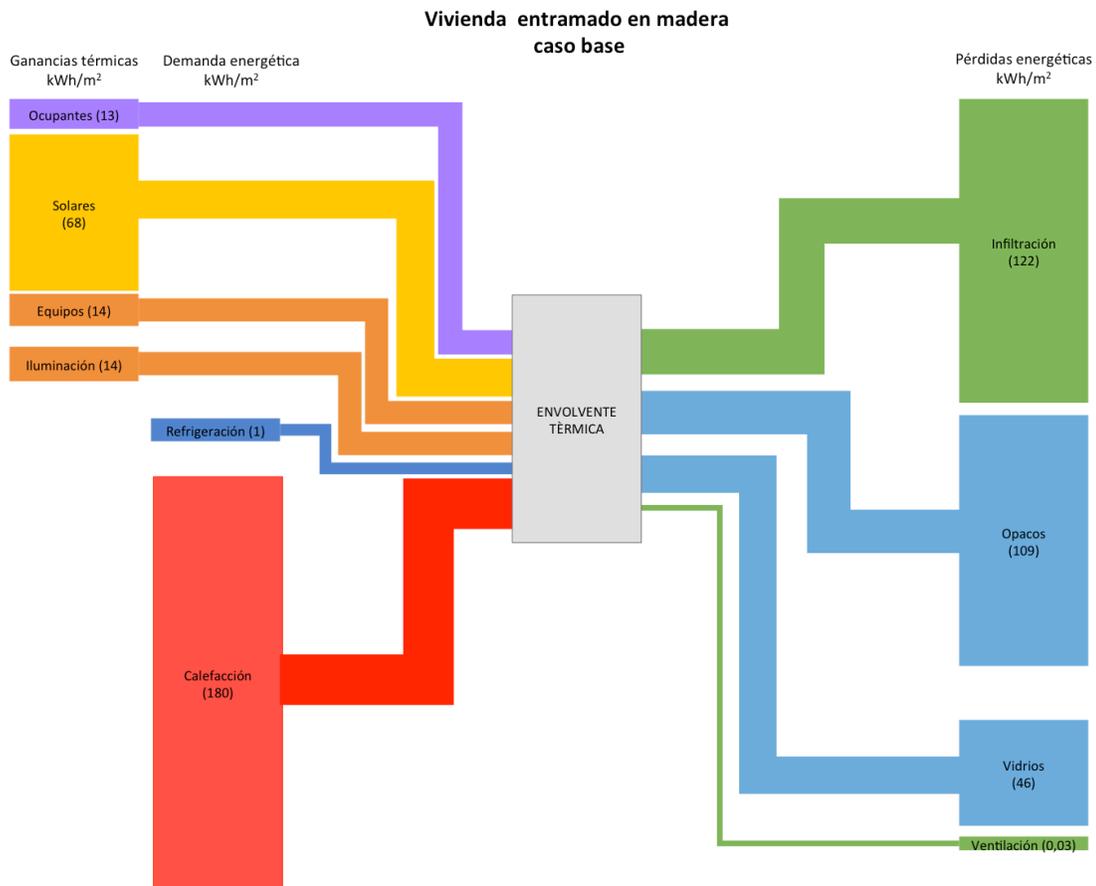


Figura 41: Diagrama Sankey caso base vivienda entramado de madera (Fuente: Elaboración propia). En Anexo 6, pág. 163 se encuentra versión de mayor tamaño.

Las ganancias para este caso suman 109 kWh/m^2 , mientras que las pérdidas suman 272 kWh/m^2 .

Respecto de las superficies vidriadas, las ganancias solares, en este caso representan 68 kWh/m^2 año y las pérdidas por los elementos transparentes 46 kWh/m^2 año, lo que significa que el balance de las ventanas es de 22 kWh/m^2 año, sin considerar las infiltraciones que se producen por los marcos y contactos de la misma. En este caso, las pérdidas por infiltración son mayores a las ganancias de la vivienda.

En Figura 42 se presenta el diagrama Sankey de la vivienda mejorada, que cumple con las exigencias de la NTM 011. Este diagrama permite observar como se modifica el balance energético, al mejorar la hermeticidad al aire y la aislación térmica de elementos opacos y transparentes. En línea entrecortada se observa la proyección del caso base (Figura 41).

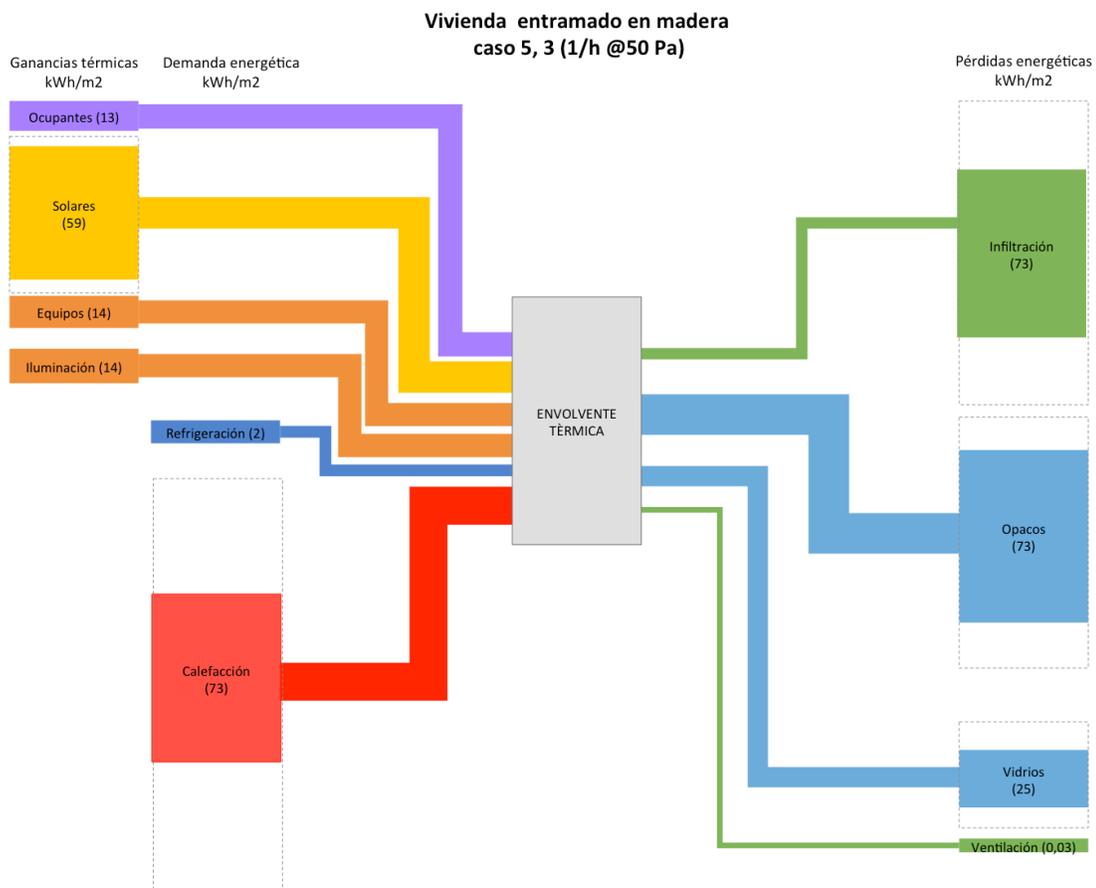


Figura 42: Diagrama Sankey caso 5_8 vivienda entramado de madera que cumple con NTM 011. En Anexo 7 pág. 164 se encuentra versión de mayor tamaño.

En este caso se observa una disminución de la demanda de 107 kWh/m^2 año, respecto del caso base. Aunque se observa un aumento de la demanda de enfriamiento al mejorar la hermeticidad de la vivienda, el valor máximo de demanda es de solo 106 kWh , es decir $2,3 \text{ kWh/m}^2$ año. Como ya se comentó anteriormente, el aumento podría ser mayor, de no considerar la apertura de ventanas como estrategia de enfriamiento.

Al comparar estos resultados con el valor límite de demanda de 99 kWh/m^2 año propuesto por Bobadilla (2014), se observa que sí se cumple con el valor límite ya que la demanda total es de 75 kWh/m^2 año. Considerando la misma configuración de la envolvente, pero con una hermeticidad al aire de 5 (1/h) la demanda baja a 60 kWh/m^2 año.

7.7 Conclusiones

Los resultados de las simulaciones permiten validar la hipótesis planteada, ya que una hermeticidad al aire de 5 (1/h @ 50 Pa) permite reducir la demanda energética en un 24% para el caso de vivienda de albañilería de ladrillo combinado con madera y un 38% para el caso de vivienda de entramado en madera .

Esos resultados, aunque positivos, no se comparan bien con los valores límite de demanda propuestos por Bobadilla, ya que el caso que cumple con la NTM 011 para la materialidad albañilería de ladrillo combinado con madera, no logra reducir su demanda bajo los 90 kWh/m²año. En el caso de entramado en madera el caso que cumple con la NTM 011 tiene una demanda de 75 kWh/m² año.

En el estado actual de la técnica de construcción es recomendable, como primera estrategia, disminuir las pérdidas por infiltraciones de aire. El ahorro de energía al adoptar esta medida supera a otras más comunes como el cambio de ventanas por termopanel. Además de presentar un menor costo. Por ejemplo para el caso de albañilería combinada con madera, una disminución de sólo dos cambios de aire hora (de 12 a 10 (1/h @50 Pa)), ofrece una disminución en la demanda superior a estrategias como cambio de ventanas o colocación de sistema EIFS 40 mm en muros primer piso. Es posible inferir que disminuir de 12 a 10 (1/h @50 Pa), implicaría aplicar pequeñas mejoras al control de las obras sin incurrir en mayores gastos.

Por último hay que destacar que una disminución sustancial de la demanda energética sólo será posible combinando mejoras a la hermeticidad y transmisión de calor de la envolvente.

Capítulo 8 Conclusiones

8.1 Conclusiones generales

A través de los resultados del desarrollo de la tesis que aquí se presenta se ha logrado dar cumplimiento al objetivo general y objetivos específicos, dar respuesta a las preguntas de investigación y verificar la hipótesis planteada.

El análisis del balance energético en los dos casos de estudio presentados, ha permitido comprender de mejor manera como afectan las infiltraciones de aire en la calidad energética de las viviendas estudiadas y ha probado ser un método muy adecuado para visualizar resultados de simulaciones, ya que permiten observar la distribución de las demandas, pérdidas y ganancias energéticas. Si bien ,solo se aplicó para el caso de las infiltraciones y la demanda energética, limitándose al balance de la envolvente, se visualiza una posibilidad de aplicación más amplia, considerando por ejemplo, modificaciones a la ganancia solar y su efecto sobre las pérdidas por transmisión de elementos opacos.

En este caso específico el estudio del balance energético de las viviendas permite identificar que porción de las pérdidas se puede disminuir para mejorar la eficiencia de la envolvente como elemento de intercambio energético con el exterior. El estudio de los casos base, permitió visualizar que a pesar de que las pérdidas por infiltración son considerables, abordar este factor de manera aislada no permite llegar a valores de demanda energética deseables. Y por consiguiente es recomendable mejorar tanto la aislación térmica como la hermeticidad al aire.

Las preguntas de investigación planteadas proponen estudiar el tema de las infiltraciones de aire de forma amplia, partiendo desde la descripción de la fenomenología hasta evaluar el impacto de la normativa chilena que actualmente se encuentra en estudio, para entrar en vigencia el próximo año.

La fenomenología de las infiltraciones de aire, es bastante compleja ya que depende de la hermeticidad al aire, que es una característica de la envolvente y de factores climáticos combinados. A diferencia de la transmitancia térmica, no es posible, en la actualidad, calcular la

hermeticidad al aire. Esto se debe a que es muy dependiente de la calidad de la ejecución de las soluciones constructivas, las que a su vez dependen del nivel de resolución de los detalles constructivos y la preparación y habilidad de los ejecutores para materializarlos. Es por esto que se deben aplicar ensayos en obra para conocer la hermeticidad de una construcción.

El cálculo de las infiltraciones, por otro lado está definido por varias ecuaciones, descritas por distintos grupos de investigación, que buscan integrar la hermeticidad al aire con las condiciones climáticas del lugar en que se emplaza la vivienda. Estas simplificaciones de cálculo se basan en supuestos de protección del viento, altura de stack y no consideran la dirección del viento. Para este estudio se decide utilizar la ecuación desarrollada en el Lawrence Berkley Laboratories (LBL), que considera factores climáticos como la velocidad del viento y el diferencial de temperatura y la calidad hermética de la envolvente a través del indicador ELA.

Respecto de las normativas internacionales, la mayoría de ellas limitan la permeabilidad al aire de las edificaciones, estableciendo valores máximos a nivel nacional o mediante una zonificación climática. En general el indicador más utilizado en Europa son los cambios de aire hora con un promedio europeo de 4 (1/h @ 50 Pa). En algunos casos se hacen diferenciaciones por destino o tipo de ventilación.

La caracterización del parque de viviendas construidas en la ciudad de Concepción, permitió identificar las materialidades predominantes en viviendas de la región y provincia, el tipo de agrupamiento, número de pisos y superficie promedio. Esta información fue utilizada para definir los casos de estudio para la definición de la línea base, el cálculo de la línea base de demanda y la definición de los casos de estudio.

En base a los resultados de la caracterización del parque se definieron categorías de viviendas, considerando parámetros constructivos y configuración arquitectónica. De dichas categorías se definió una muestra representativa, la que se ensayó para conocer su hermeticidad al aire, datos con los que se construyó la línea base de hermeticidad al aire de edificaciones de vivienda. La línea base quedó definida por materialidad predominante en muros, que es el factor que mostro diferencias estadísticamente considerables en los resultados de hermeticidad. Este descubrimiento concuerda con el conocimiento que se tiene a nivel internacional del fenómeno de la hermeticidad al aire, que relaciona la mayor hermeticidad al

aire con viviendas construidas con materiales homogéneos como el hormigón y las albañilerías de ladrillo y la menor hermeticidad con edificaciones en entramado de madera u otros sistemas constructivos constituidos por la sobreposición de elementos y que contemplan encuentros entre elementos de difícil resolución constructiva.

El estudio de la demanda energética de viviendas tipo, representativas del parque construido el año 2011, permitió visualizar que las simplificaciones utilizadas hasta el momento para el cálculo de las demandas mediante simulación minimizan las pérdidas por infiltraciones de aire en la ciudad de Concepción. El cálculo de demanda energética considerando la hermeticidad al aire de la línea base, permitió observar que las demandas son mayores a lo que se estimó en estudios anteriores. Esto implica que la metodología para la inclusión de las infiltraciones en el cálculo de demanda no está clara ni extendida entre los expertos a nivel nacional. Las simulaciones realizadas en esta etapa permitieron validar la problemática propuesta por el objetivo general de esta investigación, además de aportar información relevante para la evaluación de los resultados de los casos de estudio.

Para realizar un estudio más detallado de la influencia de las infiltraciones de aire en demanda energética de las viviendas se definieron dos casos de estudio, que representan más del 60% de las viviendas construidas el año 2011 en Concepción considerando como parámetro diferenciador la materialidad predominante en muros. El ejercicio de simulación de demandas en base a cinco casos de mejora a la aislación térmica y 5 o 6 casos de hermeticidad al aire, permitió observar como afectan ambos parámetros a la demanda energética y que en el caso de Concepción, en el estado actual de la técnica y calidad constructiva es recomendable aumentar la hermeticidad al aire como primera medida, pero que una reducción considerable de la demanda solo será posible si se combina el aumento de la hermeticidad con un aumento de la aislación térmica.

En este estudio se simuló demandas con 3 (1/h @50 Pa) y 0,6 (1/h @50 Pa) como referencia, pero los resultados no se consideraron para la evaluación de propuestas de mejoras. Ya que el análisis de estos resultados debe considerar que para lograr niveles de hermeticidad acorde con los límites fijados por Alemania y por el estándar Passivhaus exige incluir elementos constructivos que aún no están generalizados en el mercado local. Por otro lado hay que considerar el nivel de preparación que tienen los carpinteros alemanes en

comparación a los chilenos. En Alemania, los carpinteros cuentan con una capacitación formal, equivalente a un título técnico que implica al menos 3 años de estudio. Es por esto que proponer valores límite tan bajos, supone un trabajo a largo plazo que incluya formación técnica de carpinteros, colocar en el mercado materiales adecuados para las prestaciones que aquí se describen entre otras estrategias a implementar.

Respecto de la propuesta normativa contenida en la NTM 011 impulsada por el MINVU, la disminución de la demanda energética es significativa y supone una mejora considerable respecto a la construcción actual. Comparados con los valores límite de demanda expresados por Bobadilla (2014) en su investigación doctoral, los casos que cumplen con los valores límite propuestos por la NTM 011 no cumplen con el valor máximo de demanda de 90 kWh/m²año, en el caso de albañilería de ladrillos combinada con madera. El caso materializado en madera si logra cumplir con el valor propuesto. De los resultados del análisis del balance térmico se concluye que para lograr una demanda de 90 kWh/m²año o menor, será necesario mejorar la hermeticidad al aire y la aislación térmica. Esto considerando sólo los parámetros de estudio, ya que las mejoras a implementar podrían relacionarse con estrategias de diseño pasivo, que escapan al ámbito de esta investigación.

Asimismo, el poco conocimiento de las técnicas constructivas y materiales que mejoran la hermeticidad al aire de las edificaciones, especialmente la relación directa de cada técnica aplicada con las mejoras a la hermeticidad, dificulta dimensionar el impacto económico de, por ejemplo, mejorar la hermeticidad a los niveles exigidos por a NTM 011/3. Es necesario reconocer que en ningún país se conoce la relación exacta entre las mejoras a la envolvente y la hermeticidad, ya que éstas dependen de factores como la calidad de la mano de obra y nivel de resolución de detalles de encuentros, entre otros. Por lo que se reconoce como necesario caracterizar las propiedades herméticas de los materiales constructivos para poder orientar mejor los esfuerzos por mejorar la hermeticidad al aire.

8.2 Futuras investigaciones

La investigación aquí descrita presenta un marco de conocimiento general sobre la hermeticidad al aire y la demanda energética de las viviendas en la ciudad de Concepción, que permite visualizar distintas posibilidades de investigación.

El desarrollo de esta investigación implicó entender como una representación visual del balance energético de un edificio permite comprender de manera rápida gran cantidad de datos y visualizar las posibilidades de mejora de un caso. Realizar más pruebas aplicando esta metodología, permitirá validar lo que se visualizó mediante esta investigación. Las aplicaciones de estas imágenes podrían estar en la academia, el diseño pasivo y los mejoramientos de edificios ya construidos.

Los casos de estudio permitieron ver como afectan los niveles de hermeticidad al aire la demanda energética de dos casos. En opinión de la autora y considerando su formación de arquitecto, sería provechoso analizar conjuntamente otras variables como orientación, porcentaje de vanos, compacidad, etc. Ya sea mediante el estudio de casos o otra técnica que permita analizar mayor cantidad de opciones (parametrización de simulaciones).

Respecto de la validez del cálculo de las infiltraciones, al momento no existen determinaciones realizadas en Chile que arrojen datos de infiltraciones. De contar con el equipamiento adecuado, sería posible evaluar las infiltraciones de aire y compara con los valores calculados mediante ecuación LBN.

Otro punto importante, que lamentablemente escapa a los alcances de esta tesis, es como lograr los niveles de hermeticidad al aire requeridos. En este ámbito se han realizado propuestas de detalles constructivos, como los presentados en el Manual de Hermeticidad al aire de Edificaciones y se han realizado algunas tesis de pregrado y postgrado (Torres, 2014) centradas en determinar cuando afectan ciertas técnicas constructivas y materiales a la hermeticidad al aire. Pero en general aún queda mucho conocimiento por construir.

A nivel general, las infiltraciones de aire constituyen una línea de investigación con amplias posibilidades desde el punto de vista de la conservación de la energía.

Bibliografía

- AENOR. (2002). *Aislamiento térmico. Determinación de la estanquidad al aire en edificios. Método de presurización por medio de ventilador. (ISO 9972:1996, modificada). UNE-EN 13829:2002*. Madrid: AENOR.
- Alfano, F. R. d'Ambrosi., Dell'Isola, M., Ficco, G., & Tassini, F. (2012). Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using the fan pressurization method. *Building and Environment*, 53, 16–25. doi:10.1016/j.buildenv.2011.12.017
- Álvarado, R. G., & González, A. (2014). Condiciones de forma y desempeño energético de viviendas unifamiliares Form conditions and energy performance of single-family housing in Resumen. *Revista INVI*, 28(80), 111–141.
- ASHRAE. (2004). *ASHRAE 119: Air Leakage Performance for Detached Single-Family Residential Buildings* (p. 17).
- ASHRAE. (2009). *ASHRAE Handbook Fundamentals* (2009th ed., Vol. 30329, p. 997). ashrae.
- ASTM. (2011). *ASTM E1827:11. Standard Test Methods for Determining Airtightness of Buildings Using an Orifice Blower Door* (p. 12).
- Berge, A. (2011). *Analysis of Methods to Calculate Air Infiltration for Use in Energy Calculations*. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Retrieved from <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/147421.pdf>
- Bobadilla, A. (2014). *Calidad Energética y Ambiental Interior de la Edificación Habitacional en Chile. Análisis de las tendencias, logros y desafíos pendientes*. Université catholique de Louvain.
- Building Research Establishment. (2014). *Código de Construcción Sustentable para Viviendas, Chile*.

- Bustamante, W. (2004). Estudio de comportamiento térmico de viviendas en diferentes ciudades de Chile. Bases para una zonificación climático-habitacional. *Revista de La Construcción*, 3(1), 46–59. Retrieved from http://www7.uc.cl/ccivil_revista/revista/Rev_4/_REVISTA_N4_FULL.pdf
- Bustamante, W., Cepeda, R., Martínez, P., & Santa María, H. (2009). Eficiencia energética en vivienda social: un desafío posible. In *Camino al Bicentenario - Propuestas para Chile* (pp. 253–282). Santiago de Chile.
- Bustamante, W., Rozas, Y., Cepeda, R., Encinas, F., & Martínez, P. (2009). *Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social*. (W. Bustamante, DITEC Ministerio de Vivienda y Urbanismo, & Programa País de Eficiencia Energética, Eds.) (Primera., p. 203). Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Carrié, F. R., & Wouters, P. (2012). *Technical Note AIVC 67: Building airtightness: a critical review of testing, reporting and quality schemes in 10 countries* (p. 40).
- Celis, F., Díaz, M., Echeverría, E., García Alvarado, R., Escorcía Oyola, O., & Trebilcock, M. (2012). Incidence of Architectural Configuration on Energy Efficiency of Dwellings in the Centre-South of Chile. In *PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture*. Lima, Perú 7-9 November.
- Celis, F., Escorcía, O., Díaz, M., & García, R. (2012). Incidencia de la Forma y Envoltente en el Desempeño Térmico de las Viviendas del Centro-Sur de Chile. *Habitat Sustentable*, 2(2), 19–33.
- Céspedes Isla, C., López Sánchez, B., Vargas Mac-Carte, G., & Bobadilla, A. (2012). Diseño de muestreo para la elaboración de la línea base de los factores que determinan las infiltraciones al aire en las edificaciones de Chile. In *X Congreso Latinoamericano de sociedades de estadística*. Córdoba, Argentina.
- Citec UBB. (2013). *Informe Resultado Producción 3: Clases de infiltración aceptable Fondef D10 I 1025* (p. 156). Concepción, Chile.

- Citec UBB, & Decon UC. (2012). *Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos* (p. 112). Santiago de Chile.
- Citec UBB, & Decon UC. (2014). *Manual de Hermeticidad al aire de Edificaciones*. (M. Trebilcock, Ed.) (p. 246).
- Department of communities and local government. (2010a). *The Building Regulations 2000, Approved document L1A: Conservation of fuel and power in new dwellings* (p. 34). Retrieved from http://www.planningportal.gov.uk/uploads/br/BR_PDF_ADL1A_2010.pdf
- Department of communities and local government. (2010b). *The Building Regulations 2000, Approved document L2A: Conservation of fuel and power new buildings other than dwellings* (p. 39). Retrieved from http://www.planningportal.gov.uk/uploads/br/BR_PDF_ADL2A_2010.pdf
- Deutsches Institut für Normung. DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden — Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung (2007).
- DITEC Ministerio de Vivienda y Urbanismo, & Urbanismo, M. de V. y. (2013). Calificación Energética de Viviendas. Retrieved from <http://calificacionenergetica.minvu.cl>
- Dorer, V., Tanner, C., & Weber, A. (2004). *VIP08 Airtightness of buildings* (pp. 1–8).
- Economidou, M. (2011). *Europe 's buildings under the microscope*. (B. Atanasiu, C. Despret, M. Economidou, J. Mai, I. Nolte, & O. Rapf, Eds.) (p. 132). Buildings Performance Institute Europe.
- Feist, W. (2011). PHPP 2007 Manual para la certificación “ Estándar Passivhaus ,” 1–8.
- Fissore, A., & Colonelli Pérez-Cotapos, P. (2008). *Sistema de certificación energética de viviendas Informe etapa 2: Determinación de la línea base*.

- González, A., & Díaz, M. (2013). Función e impacto del archivo climático sobre las simulaciones de demanda energética. *Habitat Sustentable*, 3(2), 75–85. Retrieved from <http://revistahabitatsustentable.cl/inicio.html>
- Heijmans, N., Wouters, P., & Heiselberg, P. (2008). *Ventilation Information an overview of national trends related to innovative ventilation systems* (pp. 1–4).
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2011). *Informe anual 2011* (p. 138). Santiago de Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2008). NCH 1079 Arquitectura y Construcción- Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico.
- Instituto Nacional de Normalización. (2013). *NCh 3295:2013 Determinación de la tasa de fuga de aire mediante el método de presurización mediante ventilador*.
- Jokisalo, J., Kurnitski, J., Korpi, M., Kalamees, T., & Vinha, J. (2009). Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses. *Building and Environment*, 44(2), 377–387. doi:10.1016/j.buildenv.2008.03.014
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2002). *Manual del usuario CCTE_CL* (primera ed., p. 32). Santiago de Chile.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2006). Ordenanza General de Urbanismo y construcciones Artículo 4.1.10. In *Manual de aplicación de la reglamentación térmica* (p. 11). Santiago de Chile.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2014a). *ED11-Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo* (Vol. 1434, p. 364).
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2014b). *Ordenanza General de Urbanismo y Construcción* (p. 377). Santiago de Chile.

- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2014c). *Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento ambiental de las edificaciones . Parte 2 : Comportamiento higrotérmico.*
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2014d). *Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento ambiental de las edificaciones . Parte 3 : Calidad del aire interior.*
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Ministerio de Obras Públicas, & Ministerio de Energía. (2013). *Estrategia Nacional de Construcción Sustentable* (pp. 1–50).
- Modera, M. P., Sherman, M. H., & Levin, P. (1983). A Detailed Examination of the LBL Infiltration Model Using the Mobile Infiltration Test Unit. *ASHRAE Transactions*, 89.
- Norma Española. HS 3 Calidad del aire interior. , Código técnico de la Edificación 144 (2009). España.
- Pan, W. (2010). Relationships between air-tightness and its influencing factors of post-2006 new-build dwellings in the UK. *Building and Environment*, 45(11), 2387–2399.
doi:10.1016/j.buildenv.2010.04.011
- Sherman, M. (1986a). *Exegesis of proposed ASHRAE Standard 119: Air Leakage Performance for Detached Single-Family Residential Buildings* (p. 22). Berkeley, California.
- Sherman, M. (1986b). Infiltration degree-days: A statistic for quantifying infiltration-related climate. In *ASHRAE Transactions V.92*.
- Sherman, M. H., & Modera, M. P. (1986). Comparison of measured and predicted infiltration using the lbl infiltration model. In H. Trechsel & P. Lagus (Eds.), *Measured Air Leakage of Buildings: A Symposium* (Vol. 904, pp. 325–347). Philadelphia, USA.
- Sohr, R. (2012). *Chile a Ciegas: La triste realidad de nuestro modelo energético* (1° Edición., p. 294). Santiago de Chile: Debate Cloección.

Torres, V. (2014). *ESTANQUEIDAD AL AIRE DE LA ENVOLVENTE DE MADERA Visión crítica de la construcción en madera en Concepción, Chile desde una óptica de soluciones extranjeras*. Universidad del Bío-Bío.

Tuschinski, M. (2014). EnEV 2009 - Energieeinsparverordnung für Gebäude. Retrieved from http://www.enev-online.org/enev_2009_volltext/

Anexos

Anexo 1: definición morfológica-constructiva de viviendas tipo

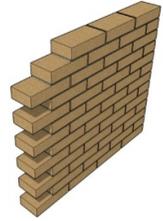
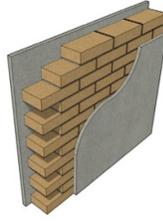
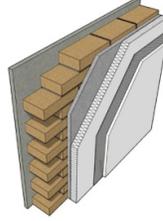
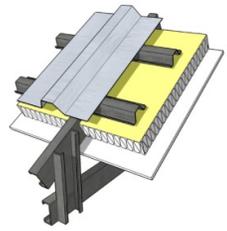
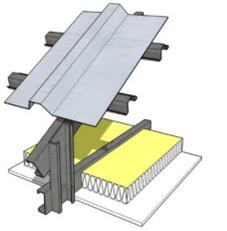
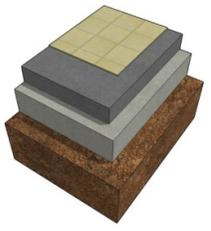
TIPOLOGÍA	Nº 3	CÓDIGO	VAL2A
------------------	-------------	---------------	--------------

Descripción	Vivienda de albañilería de ladrillo de dos pisos, aislada.
-------------	--

Superficie	75 m ²	Superficie envolvente	212 m ²	Superficie ventanas	6.05 m ²	Volumen	171 m ³	Factor de Forma	1,24
-------------------	-------------------	------------------------------	--------------------	----------------------------	---------------------	----------------	--------------------	------------------------	------



PRINCIPALES CONFIGURACIONES DE ENVOLVENTES

			RANGO PROPIEDADES TÉRMICAS U (W/m ² K)
<p>Muro simple Espesor 14 mm.</p>	<p>Muro estucado Mortero cemento Espesor 25 mm.</p>	<p>Muro con refuerzo térmico EIFS</p>	<p>U muro : 2,5 - 1,1 U techo : 0,84 - 0,38 U piso : 1,5</p>
 <p>Techumbre Aislación bajo costaneras</p>	 <p>Techumbre Aislación sobre cielo</p>	 <p>Piso simple</p>	

Anexo 2: Caso de estudio Albañilería combinada con madera.

Transmitancia térmica de la envolvente opaca

Para los elementos opacos de la envolvente se consideraron cuatro escenarios de mejoramiento.

Elementos constructivos base

Esta configuración es la que se desprende de los planos de detalle y especificaciones técnicas de la vivienda en estudio. En las tablas siguientes se muestran las capas que componen cada elemento y su transmitancia térmica.

Tabla 44: Muro primer piso caso base

Material	Caso favorable			Caso desfavorable		
	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/ λ	espesor (metros)	Conductividad d λ	espeso $r/$ λ
1 Estuco mortero hidrófugo	0,01	1,4	0,01	0,01	1,4	0,01
2 Ladrillo hueco reforzado estructural	0,14	0,33	0,42	-	-	-
2 Hormigón	-	-	-	0,14	1,63	0,09
3 Placa yeso cartón	0,01	0,24	0,04	0,01	0,24	0,04
$R_{si} + R_{se}$			0,17			0,17
R_t suma			0,64			0,3
U (W/m^2K)			1,56			3,28
Ponderación			76%			24%
Total U (W/m^2K)			1,78			

Tabla 45: Muro segundo piso caso base

Material	Caso favorable			Caso desfavorable		
	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/ λ	espesor (metros)	Conductividad d λ	espeso $r/$ λ
1 OSB con revestimiento plástico	0,011	0,15	0,07	-	-	-
2 Madera pino insigne	0,1	0,104	0,96	-	-	-

2	Aislación térmica 10 kg	-	-	-	0,07	0,043	1,63
2	Cámara de aire no ventilada	-	-	-	0,03	0,024	0,23
3	Yeso cartón	0,01	0,24	0,04			
	R _{si} + R _{se}			0,17			0,17
	Rt suma			1,25			2,14
	U (W/m ² K)			0,80			0,47
	Ponderación			20%			80%
Total U (W/m²K)					0,51		

Tabla 46: Techo caso base

Material	Caso favorable			Caso desfavorable		
	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/λ	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/λ
1 Plancha Zincalum	0,050	112,000	0,000	0,050	112,000	0,000
2 Plancha OSB	0,011	0,150	0,070	0,011	0,150	0,080
2 Madera pino insigne	0,140	0,104	1,350	-	-	-
3 Lana mineral	-	-	-	0,100	0,043	2,330
Yeso cartón	0,010	0,240	0,040	0,010	0,240	0,040
			0,140			0,140
			1,610			2,610
			0,620			0,380
			5%			95%
Total U (W/m²K)					0,39	

Tabla 47: cielo caso base

Material	Caso favorable			Caso desfavorable		
	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/λ	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor / λ
1 yeso cartón	0,015	0,240	0,060	0,015	0,240	0,060
2 Aislación lana mineral	0,100	0,043	2,330	0,100	0,043	2,330
2 entramado madera	0,100	0,104	0,960	-	-	-
			0,140			0,140
			3,490			2,560
			0,290			0,390
			19%			81%
Total U (W/m²K)					0,37	

(Fuente Tabla 44 a Tabla 52: Elaboración Propia)

Elementos constructivos mejorados

En esta sección se describen las mejoras aplicadas a la aislación térmica de muros, radier en contacto con el terreno y techo.

Tabla 48: Muro primer piso mejorado

Material	Caso favorable			Caso desfavorable		
	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/ λ	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/ λ
1 Estuco mortero hidrófugo	0,010	1,400	0,010	0,010	1,400	0,010
2 Poliestireno expandido (EIFS) 20kg	0,010	0,038	0,650	0,025	0,038	0,650
3 Ladrillo hueco reforzado estructural	0,140	0,330	0,420	-	-	-
3 Hormigón	-	-	-	0,140	1,630	0,090
4 Placa yeso cartón	0,010	0,240	0,040	0,010	0,240	0,040
$R_{si} + R_{se}$			0,170			0,170
R_t suma			1,290			0,960
U (W/m^2K)			0,770			1,05
Ponderación			76%			24%
Total U (W/m^2K)			0,82			

Tabla 49: Muro primer piso mejorado

Material	Caso favorable			Caso desfavorable		
	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/ λ	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/ λ
1 Estuco mortero hidrófugo	0,010	1,400	0,010	0,010	1,400	0,010
2 Poliestireno expandido (EIFS) 20kg	0,050	0,038	1,300	0,050	0,038	1,300
3 Ladrillo hueco reforzado estructural	0,140	0,330	0,420	-	-	-
3 Hormigón	-	-	-	0,140	1,630	0,090
4 Placa yeso cartón	0,010	0,240	0,040	0,010	0,240	0,040
$R_{si} + R_{se}$			0,170			0,170
R_t suma			1,950			1,610
U (W/m^2K)			0,510			0,620

Ponderación		76%		24%
Total U (W/m²K)		0,55		

Tabla 50: Techo mejorado

Material	Caso favorable			Caso desfavorable		
	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/λ	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor / λ
1 Plancha Zinalum	0,050	112,000	0,000	0,050	112,000	0,000
2 Plancha OSB	0,011	0,150	0,070	0,0115	0,150	0,080
2 Madera pino insigne	0,140	0,104	1,350	-	-	-
3 Poliestireno expandido	0,100	0,038	2,600	0,100	0,038	2,600
Yeso cartón	0,010	0,24	0,040	0,010	0,240	0,040
R _{si} + R _{se}			0,140			0,140
Rt suma			4,210			2,890
U (W/m ² K)			0,240			0,350
Ponderación			5%			95%
Total U (W/m²K)			0,34			

Tabla 51: cielo mejorado

Material	Caso favorable			Caso desfavorable		
	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/λ	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/λ
1 yeso cartón	0,015	0,240	0,060	0,015	0,240	0,060
2 Poliestireno expandido	0,100	0,038	2,600	0,100	0,038	2,600
2 entramado madera	0,100	0,104	0,960	-	-	-
R _{si} + R _{se}			0,140			0,140
Rt suma			3,770			2,840
U (W/m ² K)			0,270			0,350
Ponderación			19%			81%
Total U (W/m²K)			0,33			

Tabla 52: piso mejorado

	Material	espesor (metros)	Ancho (metros)
1	Radier	0,150	-

2	Poliestireno expandido 20 kg.	0,100	1,000
Total U (W/m²K)		0,8	

(Fuente Tabla 48 a Tabla 52: Elaboración propia)

Anexo 3: Caso de estudio entramado de madera

Transmitancia térmica de la envolvente opaca

Para los elementos opacos de la envolvente se consideraron cuatro escenarios de mejoramiento.

Elementos constructivos base

Esta configuración es la que se desprende de los planos de detalle y especificaciones técnicas de la vivienda en estudio. En las tablas siguientes se muestran las capas que componen cada elemento y su transmitancia térmica.

Tabla 53: Muro exterior caso base

Material	Caso favorable			Caso desfavorable		
	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/ λ	espesor (metros)	Conductividad d λ	espeso $r/$ λ
1 Smartpanel	0,011	0,15	0,07	0,011	0,15	0,07
2 Lana mineral 40kg	0,05	0,042	1,19	0,05	0,042	1,19
2 Aire quieto	0	0	0,23	0	0	0,23
2 Terciado ranurado	0,009	0,116	0,08	0,009	0,116	0,08
3 Madera pino isigne	0,1	0,104	0,96			
$R_{si} + R_{se}$			0,17			0,17
R_t suma			1,28			1,74
U (W/m ² K)			0,78			0,57
Ponderación			20%			80%
Total U (W/m²K)			0,61			

Tabla 54: Techo caso base

Material	Caso favorable			Caso desfavorable		
	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/ λ	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/ λ
1 Plancha Zincalum	0,050	112,000	0,000	0,050	112,000	0,000

Tabla 55: cielo caso base

Material	Caso favorable			Caso desfavorable		
	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/ λ	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor / λ
1 yeso cartón	0,015	0,240	0,060	0,015	0,240	0,060
2 Aislación lana mineral	0,100	0,043	2,330	0,100	0,043	2,330
2 entramado madera	0,100	0,104	0,960	-	-	-
$R_{si} + R_{se}$			0,140			0,140
Rt suma			3,490			2,560
U (W/m ² K)			0,290			0,390
Ponderación			19%			81%
Total U (W/m²K)			0,37			

Tabla 56: piso mejorado

Material	espesor (metros)	Ancho (metros)
1 Radier	0,150	-
2 .Terreno	--	--
Total U (W/m²K)		1,7

(Fuente Tabla 54 a tabla 56: Elaboración Propia)

Elementos constructivos mejorados

En esta sección se describen las mejoras aplicadas a la aislación térmica de muros, radier en contacto con el terreno y techo.

Tabla 57: Muro primer piso mejorado

Material	Caso favorable			Caso desfavorable		
	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/ λ	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/ λ
1 Smartpanel	0,011	0,15	0,07	0,011	0,15	0,07
2 Madera pino isigne	0,1	0,104	0,96	0,05	0,042	1,19
3 Terciado ranurado	0,009	0,116	0,08	0	0	0,23

3	Poliestireno expandido						
	20 kg	0,02	0,0384	0,52	0,009	0,116	0,08
	R _{si} + R _{se}			0,170			0,170
	R _t suma			1,80			2,00
	U (W/m ² K)			0,55			0,50
	Ponderación			76%			24%
Total U (W/m²K)				0,51			

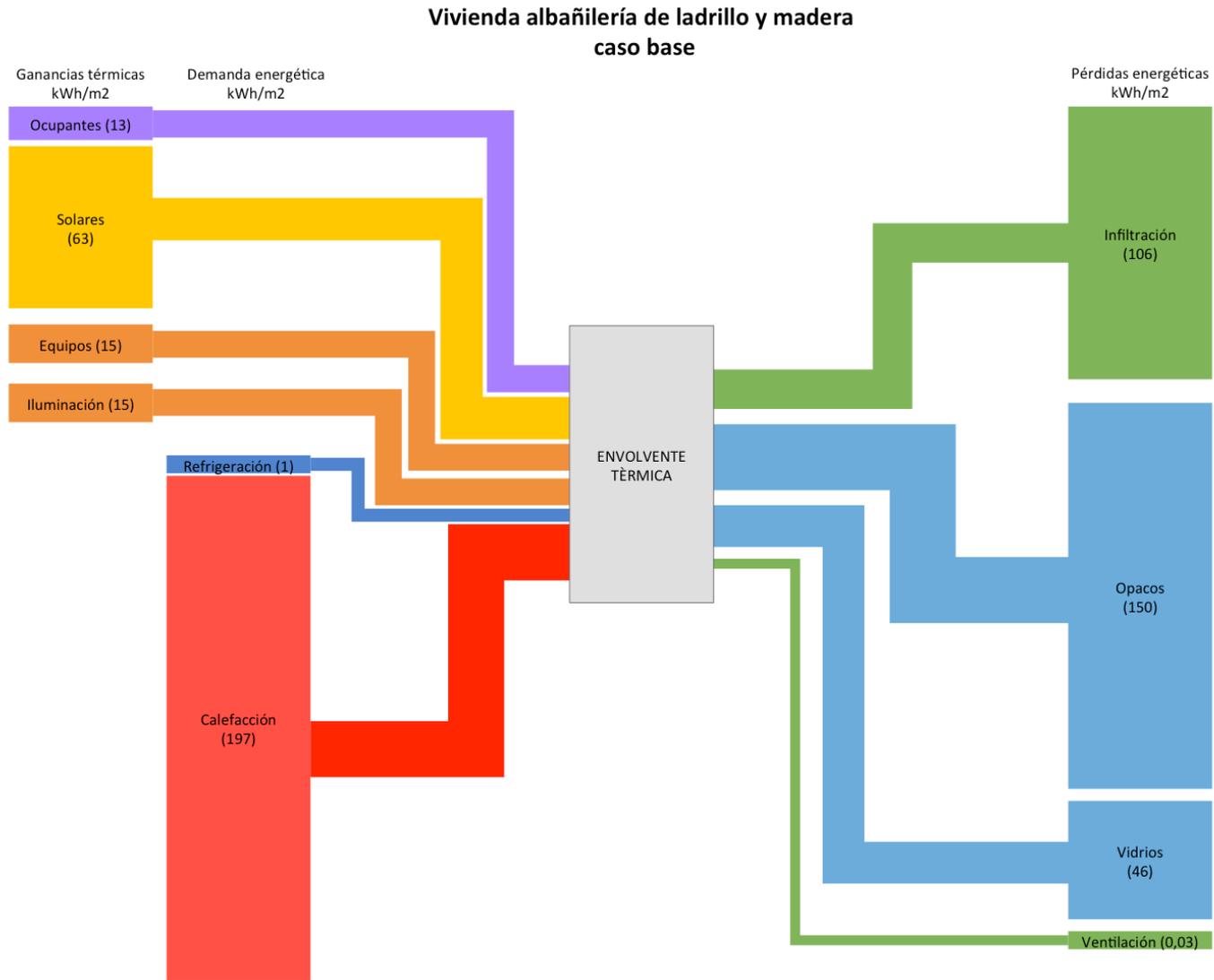
Tabla 58: cielo mejorado

	Material	Caso favorable			Caso desfavorable		
		espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/ λ	espesor (metros)	Conductividad λ	espesor/ λ
1	yeso cartón	0,015	0,240	0,060	0,015	0,240	0,060
2	Poliestireno expandido	0,100	0,038	2,600	0,100	0,038	2,600
2	entramado madera	0,100	0,104	0,960	-	-	-
	R _{si} + R _{se}			0,140			0,140
	R _t suma			3,770			2,840
	U (W/m ² K)			0,270			0,350
	Ponderación			19%			81%
Total U (W/m²K)				0,33			

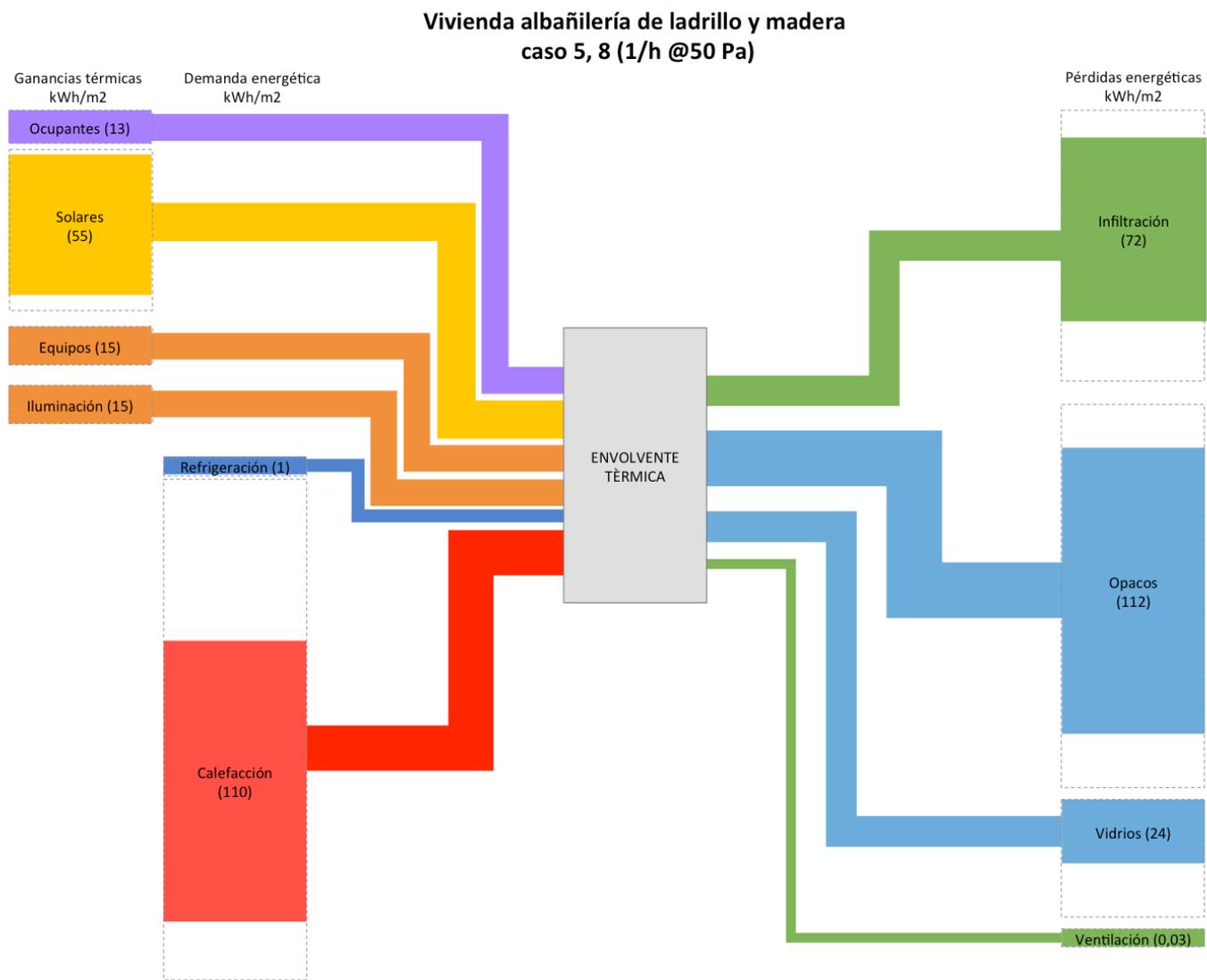
Tabla 59: piso mejorado

	Material	espesor (metros)	Ancho (metros)
1	Radier	0,150	-
2	Poliestireno expandido 20 kg.	0,100	1,000
Total U (W/m²K)			0,8

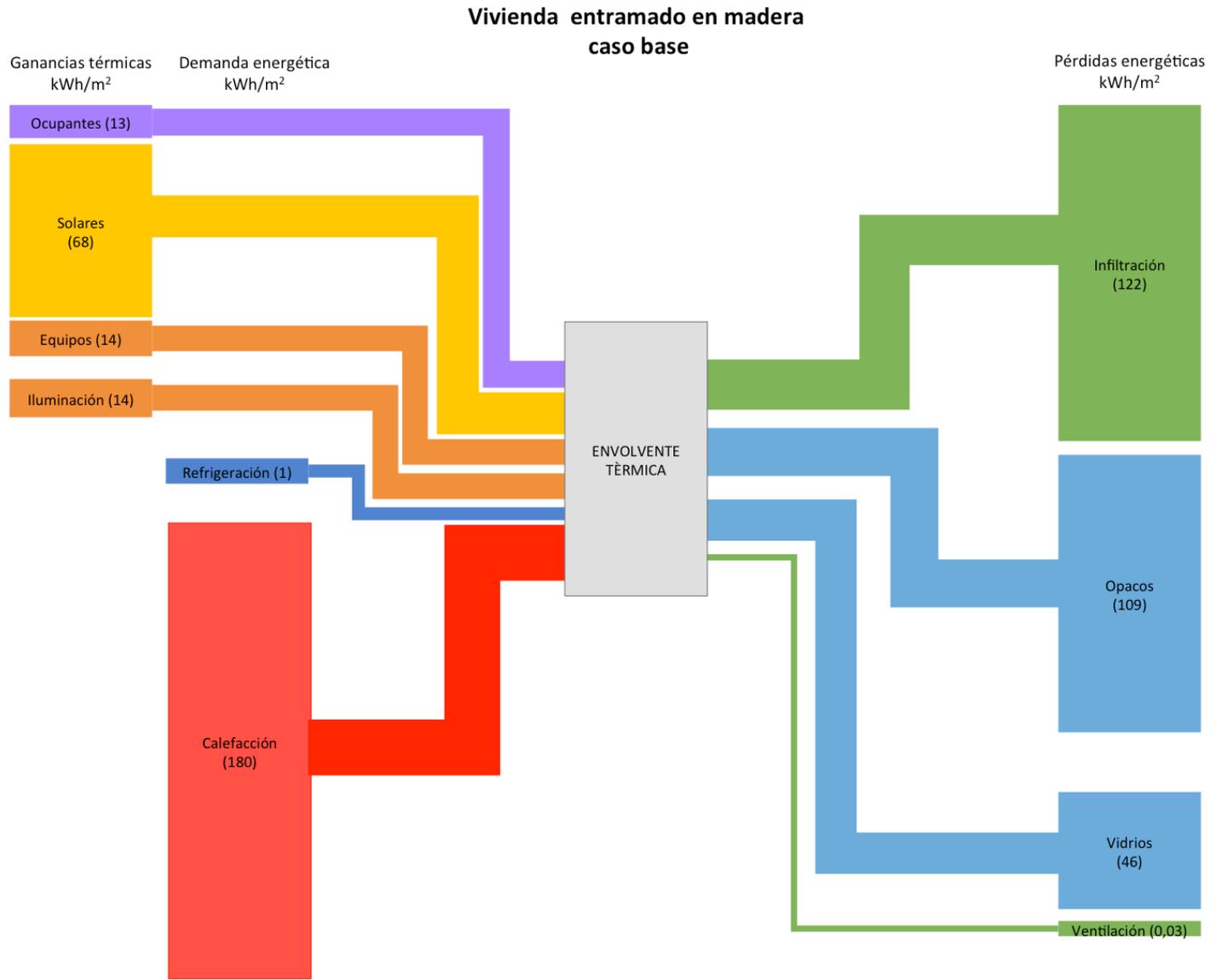
Anexo 4: Diagrama Sankey caso base vivienda albañilería de ladrillo y madera



Anexo 5: Diagrama Sankey vivienda albañilería de ladrillo y madera que cumple con NTM 011



Anexo 6: Diagrama Sankey caso base vivienda entramado de madera



Anexo 7: Diagrama Sankey vivienda entramado de madera que cumple con NTM 011

