



FACULTAD de
ARQUITECTURA
CONSTRUCCIÓN
y DISEÑO
UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

Tesis para optar al grado de
Magíster en Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética

Identificación e impacto de variables asociadas con la brecha de desempeño en hogares vulnerables

Nombre tesista:

Sebastián Seguel Vargas

Marzo, 2023

Prof Guía: Dr. Alexis Pérez-Fargallo

Prof Co-Guía: Dr. Carlos Rubio-Bellido



MAESTRÍA EN
HÁBITAT SUSTENTABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

5 Años

PROGRAMA ACREDITADO

Resolución 10 de agosto de 2017
Fecha 17 de diciembre de 2012

ANACAP - ANEP - ANEP - ANEP

Resumen

Resumen

Reducir el consumo energético, sobre todo en el sector de la construcción que representa casi el 40% de la energía global es urgente. En el caso particular de Chile, donde los ingresos están tan mal distribuidos, el costo de la energía es alto y la calidad de la envolvente térmica de las viviendas es deficiente, se traduce en una situación grave en términos de demanda energética y niveles de confort térmico de los hogares vulnerables. Para mejorar esta situación, se hace indispensable crear políticas públicas con metas de ahorro de energía más realistas, pero predecir el rendimiento energético del edificio de manera confiable, comprender el rol del ocupante y crear modelos más sólidos sigue siendo un problema que produce una Brecha en el Desempeño Energético (BDE). Por esto, el objetivo del estudio es identificar y medir el impacto de las variables asociadas al desempeño energético en hogares vulnerables del Centro Sur de Chile y proponer valores que permitan reducir la brecha. Para ello se realizó un análisis de sensibilidad, ajustando los parámetros de desempeño energético de entrada de un modelo base a partir de los datos analizados en los Estándares Normativos Locales, determinado los efectos que ocurren a partir de dichas modificaciones sobre el Consumo Energético Real levantado en las viviendas de la comuna de Mulchén. Los principales resultados de la investigación demuestran que las variables que más impactan sobre el desempeño energético, son la Infiltración, el Coeficiente de rendimiento de los equipos y los Límites y Horarios de activación de la calefacción, generando una diferencia del 40% entre el consumo energético de calefacción teórico y el consumo real.

Palabras claves: *brecha de desempeño energético, pobreza energética, comportamiento del ocupante, vivienda social, modelado energético de edificios, política energética de edificios.*

Abstract

Abstract

Reducing energy consumption, especially in the construction sector, which represents almost 40% of global energy, is urgent. In the particular case of Chile, where income is so poorly distributed, the cost of energy is high and the quality of the thermal envelope of the houses is deficient, this translates into a serious situation in terms of energy demand and thermal comfort levels of vulnerable homes. To improve this situation, it is essential to create public policies with more realistic energy saving goals, but reliably predicting the energy performance of the building, understanding the role of the occupant and creating more robust models continues to be a problem that produces a Gap in the Energy Performance (GEP). For this reason, the objective of the study is to identify and measure the impact of the variables associated with energy performance in vulnerable households in the Central South of Chile and propose values that allow the gap to be reduced. For this, a sensitivity analysis was carried out, adjusting the input energy performance parameters of a base model based on the data analyzed in the Local Regulatory Standards, determining the effects that occur from said modifications on the Real Energy Consumption raised in the houses of the Mulchén city. The main results of the research show that the variables that have the greatest impact on energy performance are infiltration, the equipment performance coefficient and heating activation limits and hours, generating a difference of 40% between the theoretical heating energy consumption and the actual consumption.

Keywords: *energy performance gap, energy poverty, occupant behavior, social housing, building energy modeling, building energy policy.*

Índice

Índice general

Resumen	i
Abstract.....	ii
Índice general.....	iii
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vii
Estructura de la tesis	viii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes generales.....	1
1.2. Relevancia del problema.....	1
1.3. Propósito de la investigación	4
Capítulo 2. Preguntas e hipótesis de investigación.	1
2.1. Preguntas de investigación.....	1
2.2. Hipótesis	1
2.3. Objetivos	1
2.3.1. Objetivo general	1
2.3.2. Objetivos específicos	1
Capítulo 3. Metodología	2
3.1. Síntesis de la metodología de investigación.....	2
3.2. Revisión del Estado del Arte	4
3.2.1. Revisión de la literatura asociada a parámetros de rendimiento energético en viviendas	4
3.2.2. Revisión de Estándares Normativos Locales	4
3.2.3. Definición de Variables	5
3.2.4. Definición de valores para las variables	5

Índice

3.3. Selección y caracterización del caso de estudio	7
3.3.1. Determinación del caso de estudio	7
3.3.2. Diseño metodológico	8
3.3.3. Muestra	8
3.3.4. Encuesta	8
3.4. Simulación	13
3.4.1. Modelación Caso Base	13
Capítulo 4. Resultados	16
4.1. Levantamiento de variables y valores	16
4.1.1. Estado del arte	16
4.1.2. Estándar de Construcción Sustentable para Viviendas	17
4.1.3. Caso Construido	21
4.2. Medición del impacto de las variables	26
4.2.1. Consumo Energético de Calefacción	26
4.2.2. Simulación de variables	27
4.3. Brecha de Desempeño Energético	31
Capítulo 5. Discusión	34
Capítulo 6. Conclusiones	37
Referencias bibliográficas	40
Anexo A	44
Anexo B	44

Índice

Índice de tablas

Tabla 3-1 Secciones de la encuesta y número de preguntas por área.....	9
Tabla 3-2 Listado de preguntas de la Encuesta, asociadas a las variables de desempeño energético .	9
Tabla 4-1 Levantamiento de variables que impactan sobre el consumo energético según la literatura	16
Tabla 4-2 Valores de Transmitancia Térmica U [W/(m ² K)] y Resistencia Térmica (R100).....	17
Tabla 4-3 Valores de Transmitancia Térmica para envolvente transparente, según Zonas Térmicas	17
Tabla 4-4 Temperaturas mensuales para cálculo de demanda de Calefacción y Enfriamiento.....	18
Tabla 4-5 Rendimientos generales mínimos de los equipos de calefacción	19
Tabla 4-6 Horarios de encendido de luces interior de la vivienda	20
Tabla 4-7 Variables asociadas al desempeño energético	20
Tabla 4-8 Variables asociadas al desempeño energético. Caso Base	21
Tabla 4-9 Valor U, Transmitancia térmica de la envolvente	22
Tabla 4-10 Cálculo de Potencia de iluminación instalada Caso Construido	24
Tabla 4-11 Horario de activación de Calefacción según Encuestas y Estudio	24
Tabla 4-12 Horario de activación de Refrigeración.....	25
Tabla 4-13 Horario de activación de Ventilación Natural.....	25
Tabla 4-14 Variables asociadas al desempeño energético. Caso Construido	25
Tabla 4-15 Cálculo de consumo energético de calefacción anual Caso Real	26
Tabla 4-16 Comparación de variables asociadas a la brecha de desempeño, Caso Base vs Caso Construido.....	27
Tabla 4-17 Medición del impacto de las variables del Caso Construido sobre el Consumo anual de Calefacción Caso Base.....	28
Tabla 4-18 Medición del impacto de las variables del Caso Construido sobre el Consumo anual de Calefacción Caso Real	29

Índice

Tabla 4-19 Medición de la Brecha de Desempeño Energético sobre el Caso Real	31
Tabla 4-20 Simulación de escenarios en busca de la reducción de la BDE sobre el Caso Real	32

Índice

Índice de figuras

Figura 3-1 Etapa I Estructura Metodológica	2
Figura 3-2 Etapa II Estructura Metodológica.....	2
Figura 3-3 Etapa III Estructura Metodológica	3
Figura 3-4 Perfiles horarios de activación de Calefacción. Fuente:(Muñoz Fierro et al., 2022).....	7
Figura 3-5 Fotografía de Fachada vivienda tipo levantada en la comuna estudio de Mulchén. Fuente: Elaboración propia	13
Figura 3-6 Ficha de Tipología N°5 CA5, Estudios de caracterización de viviendas	14
Figura 3-7 Planta arquitectónica del Caso Base. Fuente: Elaboración propia	14
Figura 3-8 Vista Isométrica del Caso Base en DesignBuilder. Fuente: Elaboración propia.....	15

Estructura de la tesis

Estructura de la tesis

El presente estudio se estructura en seis capítulos. En el primero, se desarrolla la introducción, que tiene por objetivo exponer los antecedentes más relevantes asociados al consumo energético en el sector residencial a nivel global y cómo la simulación está cada vez más presente para ayudar a calcularlo. No obstante, varios autores señalan las posibles razones asociadas a la BDE y sus diferentes etapas, donde la simulación juega un rol importante si no acoge de buena manera ciertos parámetros. Finalizando, con la situación actual de Chile en materia de estándares de EE en viviendas, declarando las brechas y cómo la investigación tiene por objetivo estudiarlas

El Capítulo 2, corresponde a las preguntas de investigación que nacieron de un estado del arte motivado por las inquietudes relacionadas al desarrollo de las simulaciones y cómo éstas impactan en el desempeño energético de las viviendas, generando las primeras hipótesis.

Ya en el Capítulo 3, se exhibe el desarrollo de la investigación a través de la metodología. Se comienza por una revisión del Estado del Arte y el análisis de los Estándares Normativos Locales, definiendo las variables a trabajar y desarrollar la encuesta. Una vez obtenido este instrumento, se describe el proceso de obtención de datos por medio del trabajo de campo y posteriormente cómo se desarrolló la simulación del Caso Base.

En el Capítulo 4, se declaran los resultados obtenidos del análisis de las variables, identificando cuales de ellas están asociadas al desempeño energético de las viviendas de familias vulnerables y se midió su impacto sobre el Consumo de Energético de Calefacción (CEC). Además, se concluye presentando la brecha del desempeño energético sobre el Caso Real.

En el Capítulo 5, se resumen las variables que produjeron el mayor impacto sobre el consumo y se discuten sobre las diferencias que existen con los Estándares normativos y cómo otros autores han entendido el funcionamiento de esas variables.

Por último, en el Capítulo 6, se presentan las conclusiones, indicando los resultados obtenidos y cómo se ha logrado ajustar el consumo energético de calefacción para disminuir la brecha, exponiendo las limitaciones del estudio y las futuras líneas de investigación.

Capítulo 1. Introducción

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes generales

Reducir el consumo energético es una tarea urgente ya que numerosos estudios han arrojado a luz sobre su impacto en el cambio climático (Geraldi & Ghisi, 2020). El sector de la construcción representó en 2016 casi el 40% del uso total de energía global y el 33% de las emisiones totales de Gases de Efecto Invernadero (GEI), que serían aún mayores si se tuvieran en cuenta la energía incorporada y las emisiones de todo el ciclo de vida de los edificios (Zhang et al., 2018). Si el consumo de energía y las emisiones de CO₂ aumentaron debido a la falta de mejoras en la eficiencia energética, no se debe subestimar el papel del hogar en la configuración de los patrones de consumo de energía (Charlier, 2021). Es por esto, que las políticas, programas y campañas posicionan el consumo de energía como una necesidad o derecho esencial que debe ser cubierto, indicando que la energía y el bienestar están interconectados (Alexis Pérez-Fargallo et al., 2020). Para cuantificar el consumo de energía dentro de un edificio, se deben considerar varios factores al mismo tiempo para abordar los requisitos de confort térmico: ubicación, características de la envolvente, cargas internas y equipo HVAC (Alexis Pérez-Fargallo et al., 2018).

Considerando esto, las herramientas de simulación son una excelente forma de estudiar y proyectar en la etapa de diseño el rendimiento de un edificio de forma eficiente, pudiendo medir cargas térmicas y el uso de energía resultante, junto con usarse para calcular con métricas relacionadas para la comodidad de los ocupantes y la Calidad Ambiental Interior (CAI). Un buen modelo de simulación puede ofrecer una predicción del rendimiento con un nivel adecuado de precisión, teniendo en cuenta la mayoría de las complejas interacciones e interrelaciones físicas (Jain et al., 2020).

1.2. Relevancia del problema

Aunque las herramientas de simulación dinámica de edificios se reconocen comúnmente como una forma adecuada para evaluar con precisión el rendimiento de los edificios y, por lo tanto, para desarrollar las políticas de energía casi nula, en general, aún se pueden observar discrepancias más o menos grandes entre las características simuladas y reales tanto para edificios nuevos como existentes (Kampelis et al., 2017). Aparte, tales herramientas tienden a tratar a los ocupantes de manera simplista y no reconoce su naturaleza estocástica, diversa y reactiva, lo que afecta la calidad de sus estimaciones (Azar et al., 2020), es decir, el potencial de ahorro de energía realizable no se

Capítulo 1. Introducción

evalúa fácilmente, porque el consumo de energía del edificio no se calcula fácilmente (Brøgger et al., 2018). Esta afectación en las estimaciones, es lo que conocemos como Brecha de Desempeño Energético, definida como la diferencia que existe entre el uso de energía esperado (es decir, estimado, calculado, computado, pronosticado) y el uso real relacionado con la construcción (Mahdavi et al., 2021).

Existe mucha literatura que sugiere varias causas que generan los desajustes entre la predicción (Simulación) y las mediciones (Realidad), estas causas se pueden agrupar en tres categorías principales: causas que pertenecen a la etapa de diseño, causas arraigadas en la etapa de construcción (incluida la entrega) y aquellas que se relacionan con la etapa operativa (De Wilde, 2014).

La primera causa de una brecha de desempeño dentro de la etapa de diseño está relacionada con el modelado y simulación energética del edificio (Attia et al., 2013). De hecho, aunque las herramientas de simulación dinámica de edificios son potencialmente la forma más adecuada para evaluar con precisión el rendimiento térmico de los edificios, consumen mucho tiempo y requieren una experiencia y habilidad considerables (Aste et al., 2022). Incluso con un modelo aplicado correctamente por un analista bien capacitado, todas las predicciones siguen estando sujetas a incertidumbres fundamentales, relacionadas con las condiciones climáticas reales, el perfil de ocupación, la efectividad del control solar de los habitantes y la distribución de la ganancia de calor interna (Zavrl & Stegnar, 2017).

En la etapa de construcción se presentan otras complejidades relacionadas a las estrategias de control, las malas prácticas de obra, la puesta en servicio inadecuada y la falta de participación de los contratistas en el ajuste y refinamiento de los edificios después de su finalización, causando una BDE (Herrando et al., 2016). Estas deficiencias y problemas de aprovisionamiento durante el proceso de construcción y puesta en marcha, como huecos en el aislamiento y puentes térmicos, que normalmente no se tienen en cuenta en el cálculo del consumo energético, pueden ser difíciles de detectar, ya que los edificios a menudo constan de varias capas (por ejemplo, paredes con cavidades); algunos problemas serán evidentes a partir de la medición, pero en muchos casos se necesitan inspecciones visuales para establecer problemas reales (National Measurement Network, 2012).

Ahora cuando hablamos de la etapa operativa, la presencia de los ocupantes y la interacción con varios componentes del edificio afectan significativamente las predicciones de consumo de energía

Capítulo 1. Introducción

realizadas por la simulación energética, incluso si las condiciones climáticas, la envolvente del edificio y el equipo están bien definidos (Yan et al., 2015)

La falta de procesos de Evaluación Posteriores a la Ocupación (POE por sus siglas en inglés) de rutina significa que no existe un mecanismo para mejorar el desempeño (Menezes et al., 2012). Una vía que se está siguiendo es el uso de la medición del nivel del sistema para obtener información más detallada; esto podría tomar la forma de enfoques de medición separados para la estructura del edificio, los servicios del edificio y los ocupantes (André et al., 2008), sin embargo, es difícil traducir estos datos en datos de entrada para predicciones computacionales de una manera que reduzca la brecha de rendimiento

Es por esto, que es importante tener una base de conocimientos clara sobre cómo los habitantes realmente usan la energía para mejorar las simulaciones y eficacia de las campañas de ahorro, ayudar a los responsables de la formulación de políticas a establecer objetivos más realistas y reducir la BDE (van den Brom et al., 2018). Un contexto específico se define por una variedad de factores que pueden afectar el comportamiento energético y, a su vez, la eficacia de la intervención. Las personas se ven muy afectadas por su entorno de vida, que da forma a su comportamiento (lo que hace que los sesgos cognitivos se destaquen), sus modelos culturales y prácticas sociales. Considerando el ejemplo de la vivienda social, la temperatura exterior en la proximidad de áreas contaminadas influye en las prácticas de ventilación de los inquilinos. En el mismo contexto, bajos ingresos y escasa educación energética podría inducir a los inquilinos de viviendas sociales a elegir comportamientos más gratificantes a corto plazo, pero ineficientes (DellaValle et al., 2018).

Estos diferentes comportamientos en viviendas calculadas con estándares normativos podrían sobreestimar fuertemente el consumo de climatización y el potencial ahorro de energía relacionado. Este fenómeno es bien conocido y ha sido descrito por algunos autores como "efecto rebote" y "efecto preligado" para explicar la BDE. El efecto rebote se produce cuando las mejoras en la eficiencia energética reducen el costo marginal de los servicios energéticos, lo que fomenta un mayor consumo de servicios, lo que puede compensar parte o la totalidad de la reducción en el consumo de energía y el efecto preligado se define como el bajo consumo de servicios energéticos en viviendas viejas e ineficientes antes o en ausencia de la rehabilitación energética, conduciendo a un potencial de ahorro de energía más bajo de lo esperado (Cozza et al., 2021).

Capítulo 1. Introducción

Algunos estándares internacionales, como el caso de China, utiliza el método de espacio completo a tiempo completo para calcular el consumo energético de edificios residenciales, que supone que las ganancias de calor internas de los ocupantes y los electrodomésticos son constantes y no cambian con el tiempo ni el espacio, además del sistema de aire acondicionado que funciona las 24 horas para los siete días de la semana y para todas las habitaciones (Hu et al., 2020). Este método puede ser eficaz para calcular el consumo energético de las viviendas con los estándares del país oriental, sin embargo, se hace necesario evaluar cuales son los parámetros más acordes a cada una de las realidades sociales, para determinar un consumo energético más fidedigno y evitar aumentar la BDE.

1.3. Propósito de la investigación

En el caso concreto de Chile, las demandas de calefacción en las viviendas sociales, han evolucionado en directa relación con las exigencias térmicas de proyectos habitacionales que se han ido estableciendo en los últimos años a través de la Reglamentación Térmica (RT) (Bustamante W et al., 2009). Esta normativa vigente hasta el día de hoy desde el 2007, considera aislación en complejos de techumbre, muros, pisos ventilados y ventanas con estándares bastante básicos que han colaborado a la industria a introducir gradualmente parámetros de eficiencia energética en gran parte de la envolvente y en mitigar las patologías y la incomfortabilidad térmica (Molina, 2021), sin embargo, no contempla la instalación de sistemas de refrigeración o calefacción, por lo que los usuarios deben resolver las necesidades térmicas de sus hogares por sí mismos. Como resultado, el 80% de los hogares del sur de Chile utilizan leña para calefacción, cuyo costo es entre 4 y 7 veces más económico que otros combustibles, no obstante, esto genera importantes problemas de contaminación del aire y en el 76% de los hogares, la temperatura interior durante el verano y el invierno aún no es la adecuada (Porrás-Salazar et al., 2020).

Con el fin de controlar esta contaminación del aire, las autoridades han comenzado a implementar Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) que brindan a las familias diferentes programas y subsidios orientados a mejorar la calidad de la leña, reemplazar las estufas de leña viejas y promover la modernización de los hogares (Reyes et al., 2019). Si bien estos planes de modernización energética, implementados a partir de año 2014, han sido un avance en materia de EE para las viviendas, sólo han sido instauradas para aquellas zonas declaradas como saturadas de GEI, dejando de lado otras comunas afectadas, promoviéndose por lo tanto, la Ley de Eficiencia Energética, la cual se espera entrar en vigencia el primer semestre del año 2023, obligando a empresas constructoras e inmobiliarias y los servicios de vivienda y Urbanismo, a través de sus artículos 3 y 4, a usar la

Capítulo 1. Introducción

Calificación Energética en todos los proyectos nuevos, inicialmente en viviendas (CEV) (Molina, 2021).

Esta Calificación está directamente relacionada con el Estándar de Construcción Sustentable para Viviendas (ECSV), que si bien su aplicación aún es voluntaria, busca ser un aporte a los lineamientos sobre eficiencia energética para el sector edificación que impulsa el Gobierno, como “La Política Energética de Chile 2050” publicada por el Ministerio de Energía en 2015, cuyo objetivo es establecer estándares y buenas prácticas de diseño, construcción y operación de las viviendas, nuevas o usadas, con el fin de mejorar su desempeño ambiental, económico y social, mediante la definición e incorporación de criterios de sustentabilidad, basándose en parámetros objetivos y verificables (Ministerio de Vivienda y Urbanismo - Minvu, 2018).

Sin embargo, estos parámetros objetivos no necesariamente están bien calibrados y deben ser medidos para determinar el posible impacto que podrían llegar a generar, sobre todo en aquellas viviendas de familias con menores recursos. Claramente las simulaciones digitales de comportamiento térmico han contribuido a despejar las dudas acerca de cómo los distintos parámetros de diseño arquitectónico afectan el desempeño energético de un proyecto (Bustamante & Encinas, 2012). Pero estos desempeños a evaluar suelen ser fenómenos multidimensionales, que requieren un enfoque multidimensional, el cual contenga distintos y eficaces indicadores de rendimiento acorde al desempeño medido (Martínez & Kelly, 2015). Es por esto, que la investigación tiene por objetivo identificar y medir el impacto de esas variables asociadas al desempeño energético en viviendas de familias vulnerables del Centro Sur de Chile y proponer valores que permitan reducir la Brecha de Desempeño Energético, aportando conocimiento a las políticas públicas a la hora de hacer más efectiva la toma de decisiones en las fases tempranas del proyecto, con una base de información y suposiciones más confiables, a través de simulaciones más precisas y detalladas.

Capítulo 2. Preguntas de investigación, hipótesis y objetivos

Capítulo 2. Preguntas e hipótesis de investigación.

2.1. Preguntas de investigación

¿Qué variables asociadas al Consumo Energético tienen mayor impacto en la Brecha de Desempeño en viviendas de hogares vulnerables en el Centro Sur de Chile?

¿Qué valor deben tener dichas variables para reducir la Brecha de Desempeño bajo el 10%?

2.2. Hipótesis

Las variables con mayor impacto en la Brecha de Desempeño Energético en viviendas de hogares vulnerables del Centro Sur de Chile son las consignas y horarios de uso de calefacción, los cuales calibradas adecuadamente pueden reducirla a menos de un 10%

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo general

Identificar y medir el impacto de las variables asociadas al desempeño energético en viviendas de hogares vulnerables del Centro Sur de Chile y proponer valores que permitan reducir la Brecha de Desempeño bajo el 10%.

2.3.2. Objetivos específicos

OE 1: Identificar las variables que impactan sobre la Brecha de Desempeño Energético de viviendas a partir de la revisión del estado del arte, los estándares locales y levantamiento de información en terreno.

OE2: Analizar el impacto de las variables identificadas a través de un Caso Base definido a partir de los estándares y un Caso Construido definido a partir del levantamiento de información.

OE3: Determinar la brecha de desempeño energético entre el Caso Base y el Caso Real y, establecer las variables con mayor impacto y sus valores para reducirla .

Capítulo 3. Metodología

Capítulo 3. Metodología

3.1. Síntesis de la metodología de investigación

Se proponen tres etapas asociadas a cada uno de los objetivos específicos descritos en el punto anterior.

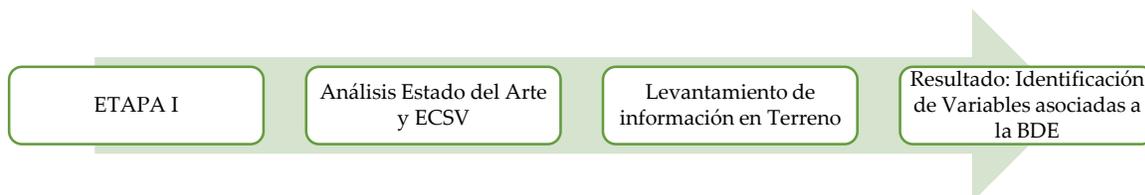


Figura 3-1 Etapa I Estructura Metodológica

En la primera etapa, se realizó un Análisis del Estado del Arte y de los Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas, ayudando a definir las variables que impactan sobre el Consumo Energético, necesario para levantar la información en terreno a través de la Encuesta, la que se trató de un documento digital elaborado a partir del Proyecto Fondecyt Regular 1200551 “Predicción de pobreza energética basada en el diseño arquitectónico de viviendas sociales en las zonas centro y centro-sur de Chile: un índice innovador para analizar y reducir el riesgo de pobreza energética” desarrollada por el Dr. Alexis Pérez Fargallo, en la comuna de Mulchén, ubicada en la zona Centro Sur de Chile en la región del Biobío, donde accedieron a participar 93 viviendas de familias vulnerables, recolectando datos relacionados a la caracterización de la vivienda, el ocupante, el consumo y el uso horario, en beneficio para el estudio (Ver

Tabla 3-2)

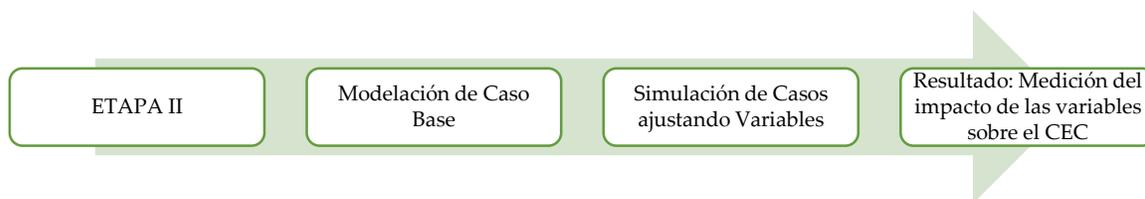


Figura 3-2 Etapa II Estructura Metodológica

En segunda instancia, se analizó el impacto de las variables identificadas en la etapa anterior, a través de la modelación de un Caso Base definido a partir de los estándares y un Caso Construido definido a partir del levantamiento de información, por medio del programa de simulación Design

Capítulo 3. Metodología

Builder (DB). Modelando 16 Casos, ajustando cada una de las variables identificadas de manera independiente, midiendo así, el impacto que tuvieron sobre el CEC del Caso Base y el Caso Real.

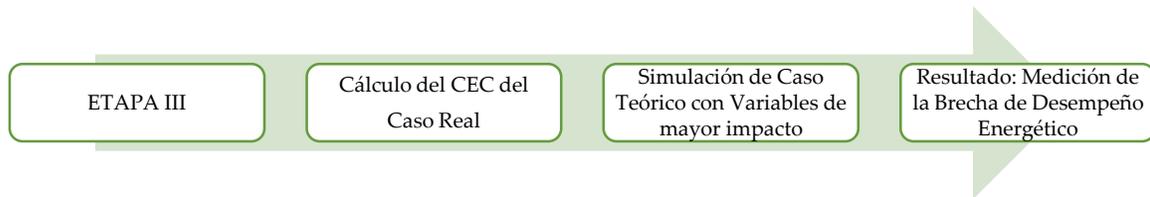


Figura 3-3 Etapa III Estructura Metodológica

Finalmente, se pasó a medir la Brecha de Desempeño Energético de Calefacción, resultante del consumo calculado para el Caso Real, de acuerdo a los datos obtenidos en las Encuestas y la simulación del Caso Base, concluyendo en 3 simulaciones para reducir la brecha, ajustando los valores de las variables que mayor impacto generaron sobre el consumo.

Capítulo 3. Metodología

3.2. Revisión del Estado del Arte

Para desarrollar un estado del arte relacionado al desempeño energético de las viviendas, fue necesario revisar las referencias, normas y estándares que se están utilizando actualmente para evaluar los hogares.

3.2.1. Revisión de la literatura asociada a parámetros de rendimiento energético en viviendas

La revisión literaria comenzó con la búsqueda de artículos científicos a través de servicios en línea de información científica tales como Web of Science, Scientific Electronic Library Online, Google Académico y ResearchGate, entre otros, utilizando categorías de análisis para levantar la información como, Consumo energético en viviendas, Brecha de desempeño energético, Pobreza energética, Modelado energético de edificios y demás, definiendo criterios de inclusión y exclusión como bases de datos, periodo y artículos más citados. Posteriormente se definió los términos de búsqueda que se emplearon con palabras clave como; brecha de desempeño energético, vivienda social, modelado energético de edificios, pobreza energética, política energética de edificios, comportamiento del usuario entre otros.

Asimismo, a través del portal Web of Science, se decidió establecer truncamientos con los términos anteriores para realizar una búsqueda de la cual se obtuvo una Nn cantidad de artículos, los que fueron exportados al software de visualización bibliométrica VOSviewer, filtrando los artículos por citas y documentos y relación entre autores. Para finalmente ser guardados y clasificados, juntos con los demás estudios, en el programa de gestión de referencias Mendeley.

3.2.2. Revisión de Estándares Normativos Locales

Se realizó una revisión a la normativa vigente en Chile, asociada a la eficiencia energética de viviendas (Reglamentación Térmica año 2007) y sobre aquellas que aún son de carácter voluntario, pero que se proyectan como las soluciones a futuro en el sector residencial (Estándar de Construcción Sustentable para Viviendas y la Calificación Energética de Viviendas año 2018).

Ahora bien, para el orden de esta investigación, se decidió evaluar el ECSV como normativa de comparación, debido a que es el único Estándar local que considera la simulación energética dentro de sus parámetros de evaluación, además de por supuesto, estimar y mejorar todas las condiciones energéticas propuestas por la RT actual.

Capítulo 3. Metodología

En la categoría “Energía” de los ECSV, se establecen los estándares de eficiencia energética para el diseño y construcción de viviendas, junto con metas de desempeño energético para la operación de las mismas. A pesar de ello, se puso especial énfasis en el análisis de la Etapa de Diseño, para determinar los valores que se establecen en las distintas variables al momento de realizar las simulaciones energéticas, concluyendo en la medición de la brecha con el Caso Real. Levantando todos los parámetros objetivos y verificables propuestos por el Estándar, para la Zona Térmica F (Interior), zonificación correspondiente a la comuna de estudio.

3.2.3. Definición de Variables

La investigación se orienta en la búsqueda del conocimiento de la brecha de desempeño energético en viviendas de familias vulnerables en la zona Centro Sur de Chile, por lo tanto, dada la condición geográfica del caso de estudio, se adoptó como variable dependiente el Consumo Energético de Calefacción (CEC), siendo una de las particularidades de la investigación, por tratarse de viviendas que combustionan principalmente de leña.

Luego de hacer la revisión del estado del arte y considerar los diferentes puntos de vista para abordar de manera más fidedigna la representación del consumo energético en la Etapa de Diseño a través de la Simulación y analizar los Estándares Normativos Locales como fuente base de comparación, se determinaron las variables independientes en la fase de Resultados, descritas en la Tabla 4-7.

3.2.4. Definición de valores para las variables

Los valores adoptados para las variables, provienen de diferentes fuentes dependiendo del Caso a evaluar. A continuación, se describen cómo se obtuvieron los datos para cada Caso estudio de acuerdo al tipo de variable estudiada.

Caso Base. En este caso de estudio se evaluaron las variables independientes de la etapa de diseño, cuyos datos fueron definidos textualmente de los estándares normativos locales, según la tipología arquitectónica de investigación y el contexto geográfico.

Caso Construido. La definición de los valores de las variables independientes en este caso, el cual corresponde a la etapa de operación, se hizo principalmente a través de las respuestas levantadas en las encuestas, las cuales se clasificaron estadísticamente por medio de filtros y fórmulas de cálculo a través del programa Excel, sin embargo, hubo algunos de los parámetros que no fue posible levantar

Capítulo 3. Metodología

su valor en terreno, determinándose a través del análisis de Manuales, Estándares e Investigaciones locales.

Un ejemplo de ello, fue la variable del Límite de Calefacción y Refrigeración, donde se adoptó el método de confort adaptativo impulsado por (Dear & Richard Brager, 1998), con una banda de +3,5 °C a -3,5 °C y un nivel de aceptabilidad del 80% (1,2), donde θ_{rm} (3) es la temperatura media móvil ponderada.

$$\text{Límite superior de la zona de confort de aceptabilidad del 80 \%} = 0,31 * \theta_{rm} + 17,8 + 3,5 \quad (1)$$

$$\text{Límite inferior de la zona de confort de aceptabilidad del 80 \%} = 0,31 * \theta_{rm} + 17,8 - 3,5 \quad (2)$$

$$\theta_{rm} = (\theta_{educar-1} + 0,8 * \theta_{educar-2} + 0,6 * \theta_{educar-3} + 0,5 * \theta_{educar-4} + 0,4 * \theta_{educar-5} + 0,3 * \theta_{educar-6} + 0,2 * \theta_{educar-7}) / 0,8 \quad (3)$$

Para el cálculo de la temperatura media de funcionamiento (θ) de un día concreto se utilizaron las temperaturas exteriores medias de los siete días anteriores, siendo $\theta_{educar-1}$ la temperatura exterior media diaria del día anterior; $\theta_{educar-2}$ la temperatura exterior promedio del día anterior y así sucesivamente usando la Ecuación (3). Estas temperaturas medias diarias a lo largo de los 365 días del año se compararon con las temperaturas de funcionamiento de las 8.760 h del año y se evaluaron dentro de los límites del 80 %.

Otra variable que es relevante de describir, es aquella relacionada con el Horario de uso de la Calefacción. El ECSV es claro en señalar que el uso de los equipos en las simulaciones es continuo, con 8.760 horas en funcionamiento activo anual, tanto para calefacción como para refrigeración, siendo esto una clara idea de porque se podría producir una brecha en el desempeño, en comparación con la cantidad de horas declaradas por las familias en el uso de la calefacción, que bordean las **9 horas diarias** según la Moda de las preguntas **Q97 y 98**, entre los meses de marzo y octubre. No obstante, para complementar esta variable, se ajustó un horario propuesto por la investigación de (Muñoz Fierro et al., 2022), por tener una concordancia con las cantidades de horas declaradas en las encuestas, el contexto donde fue levantado, la fuente de combustión y especificar de manera más óptima los perfiles de ocupación, como se muestra en la Figura 3-4.

Capítulo 3. Metodología

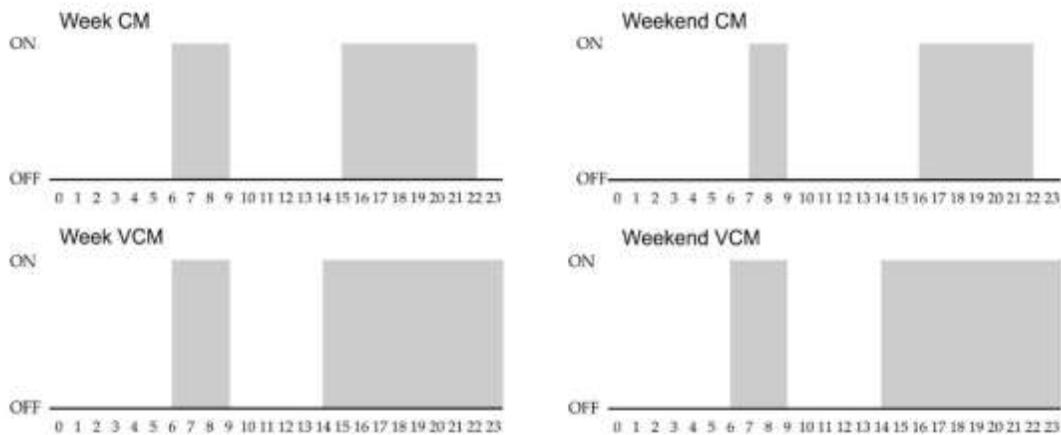


Figura 3-4 Perfiles horarios de activación de Calefacción. Fuente:(Muñoz Fierro et al., 2022)

Caso Real. Para obtener el valor de la variable dependiente de Consumo de Calefacción, correspondiente a la etapa de operación, se realizó un cálculo con el tipo de combustión más representativo de las 93 viviendas levantadas (Q89), la Moda del gasto de combustible (Q59 y 67), los meses más activos (Q97) y el tiempo de uso más ocupado (Q98). Posteriormente, se consiguió un valor de venta de 1 m³ de leña que fuera representativo de la zona a través del reporte del (Ministerio del Medio Ambiente, 2023), para luego realizar las conversiones de las unidades solicitadas, agregando el valor de la energía contenida en 1 m³ de Leña con una humedad del 40%, porcentaje de humedad más representativo de la zona de acuerdo al informe de (CDT, 2015), por medio de una calculadora de Biomasa generada por el (Ministerio de Energía, 2018), concluyendo en un consumo energético de calefacción en kWh/año.

3.3. Selección y caracterización del caso de estudio

3.3.1. Determinación del caso de estudio

El lugar de estudio de la investigación fue la comuna de Mulchén ubicada en la Región del Biobío, Chile. Esta ciudad fue escogida porque forma parte de un programa de políticas públicas que impulsan la eficiencia energética en viviendas de familias vulnerables a través del Programa Con Buena Energía (PCBE) impulsado por el Ministerio de Energía, además de encontrarse sobre el promedio de la pobreza a nivel regional según Encuesta CASEN 2006 y poseer niveles de contaminación atmosféricas preocupantes a nivel comunal.

Capítulo 3. Metodología

3.3.2. Diseño metodológico

La metodología utilizada fue cuantitativa no experimental correlacional con obtención de datos en la zona centro sur de Chile, a través del trabajo en terreno donde se recopiló información necesaria para estudiar el impacto de las variables sobre el desempeño energético referida al usuario, a las características constructivas de la vivienda, los consumos energéticos y los perfiles de uso. Esta evaluación se realizó a través de un análisis de sensibilidad, cambiando sistemáticamente los parámetros de entrada en un modelo para determinar los efectos de dichas modificaciones.

3.3.3. Muestra

Se definió un muestreo no probabilístico sobre un grupo de usuarios que fueron beneficiados por el PCBE en la comuna de Mulchén en el año 2018, por ser considerados hogares vulnerables. Este listado corresponde a 147 de familias, que se definen como aquellos hogares que se encuentran caracterizadas en el Registro Social de Hogares (RSH) con una Calificación Socioeconómica (CSE) de Tramo 1, lo que significa que pertenecen al 40% de los hogares con mayor vulnerabilidad económica (Ministerio de Desarrollo Social y Familia, 2022) apoyadas por el programa estatal, de las cuales accedieron a participar en el estudio un total de 93 viviendas en un radio cercano, entre los meses de julio y septiembre del año 2022, posterior a las cuarentenas provocadas por la pandemia COVID-19 (2019), obteniendo así datos representativos del comportamiento del ocupante en horarios de uso normales.

3.3.4. Encuesta

La toma de datos se realizó a través del diseño de una encuesta que se encuentra alojada en un sitio web, la cual se compone de un total de 156 preguntas con el propósito de obtener información socioeconómica, caracterización de la vivienda, consumo y comportamiento energético de las familias. El uso de una plataforma en línea ayudó a la sistematización de la información y a la mantención de un registro de fechas y horarios en las que se tomaron las encuestas y el tiempo de aplicación. La realización de la encuesta se acompaña de una serie de protocolos físicos como fichas de ingreso, toma de fotografías de la fachada de la vivienda y la boleta de electricidad. Se consideró, dentro de los aspectos éticos, la elaboración de un consentimiento firmado por parte de los participantes.

La encuesta completa considero 11 secciones de información, de las cuales se consideraron 7 para el apartado de preguntas asociadas a las variables de desempeño energético de la vivienda, las cuales

Capítulo 3. Metodología

no se encuentran en un orden correlativo necesariamente. La primera sección trata sobre información del hogar, las dos siguientes acerca de características física de la vivienda, luego una sección sobre energía, calefacción y enfriamiento, finalizando con temperatura interior y confort e iluminación, con un total de 27 preguntas

Tabla 3-1 Secciones de la encuesta y número de preguntas por área

Secciones	Contenido de preguntas	Preguntas
Sección 3	Información del hogar	1
Sección 4	Características de la vivienda	10
Sección 5	Características de las ventanas de la vivienda	4
Sección 6	Energía	2
Sección 9	Calefacción y enfriamiento	5
Sección 10	Temperatura interior y confort	3
Sección 11	Iluminación	2
Total		27

Tabla 3-2 Listado de preguntas de la Encuesta, asociadas a las variables de desempeño energético

Sección	Código	Pregunta	Tipo de respuesta	Variable
Sección 3: Información del hogar	Q14	¿Cuántas personas conforman su grupo familiar? Por favor seleccione una opción para cada fila. En caso de que no haya personas en cierto rango de edad, seleccione 0.	Infantes (1 a 5 años) / (0/1/2/3/4 o más integrantes)	Número de personas
			Niños/as (6 a 12 años) / (0/1/2/3/4 o más integrantes)	
Sección 4: Características de la vivienda	Q25	¿Su vivienda es Aislada, pareada o continua?	Adolescentes (12 a 20 años) / (0/1/2/3/4 o más integrantes)	Tipología Arquitectónica
	Q26	¿Cuántos pisos tiene su vivienda?	Adultos (21 a 59 años) / (0/1/2/3/4 o más integrantes)	Tipología Arquitectónica
	Q27	¿Qué superficie (metros cuadrados aproximados) tiene su vivienda? Escriba únicamente el número y no considere patio, jardín o terraza	Adultos mayores (60 años o más) / (0/1/2/3/4 o más integrantes)	Tipología Arquitectónica
	Q30	¿Cuántos dormitorios tiene la vivienda?	(1, 2, 3, 4, 5, 6, más de 6)	Tipología Arquitectónica
	Q31	¿Cuál es el material principal de la estructura de los muros de su vivienda?	(Hormigón; Ladrillo; Bloque de hormigón; Madera; Adobe; Paneles SIP; Metalcon; Otro; No lo sé)	Valor U

Capítulo 3. Metodología

	Q32	¿Cuál es el material principal de la estructura de los muros del primer piso de su vivienda?	(Hormigón; Ladrillo; Bloque de hormigón; Madera; Adobe; Paneles SIP; Metalcon; Otro; No lo sé)	Valor U
	Q33	¿Cuál es el material principal de la estructura de los muros del segundo piso de su vivienda?	(Hormigón; Ladrillo; Bloque de hormigón; Madera; Adobe; Paneles SIP; Metalcon; Otro; No lo sé)	Valor U
	Q34	¿Cuál es el material principal de la estructura del techo de su vivienda?	(Tejas o tejuela (arcilla, metálica, cemento, madera, asfáltica); Losa hormigón; Planchas metálicas (zinc, cobre, etc.); Planchas de fibrocemento (pizarreño); Fonolita o plancha de fieltro embreado; Paja, coirón, totora o caña; Otro).	Valor U
	Q35	¿Cuál es el material principal del piso de su vivienda?	(Parquet, madera, piso flotante o similar; Cerámico, porcelanato, flexit o similar; Alfombra o cubrepiso; Baldosa de cemento; Radier; Tierra)	Valor U
	Q36	¿Su vivienda dispone de aislación térmica* en los siguientes elementos (muro, techo, piso)? *Se refiere al material aislante dentro de muros, techo o piso, conocido comúnmente como poliestireno expandido (plumavit), lana mineral u otros.	Sí/ No/ No lo sé	Valor U
Sección 5: Características de las ventanas de la vivienda	Q40	¿Qué tipo de vidrio tienen las ventanas de su vivienda?	Vidrio simple, Vidrio doble, No lo sé	Valor U
	Q45	¿Qué tipo de materialidad tienen los perfiles de sus ventanas?	Acero aluminio, pvc, madera, No lo sé	Valor U
	Q50	En verano, ¿Con qué frecuencia usted u otra persona abre las ventanas o puertas al exterior para ventilar?	Menú desplegable: Más de una vez al día Todos los días o casi todos los días No todos los días, pero al menos una vez a la semana Casi nunca o nunca	Horario ventilación natural
	Q51	En invierno ¿Con qué frecuencia usted u otra persona abre las ventanas o puertas al exterior para ventilar?	Menú desplegable: Más de una vez al día Todos los días o casi todos los días	Horario ventilación natural

Capítulo 3. Metodología

		En verano, ¿Cuánto tiempo suele dejar abierta las ventanas o puertas al exterior para ventilar?	No todos los días, pero al menos una vez a la semana Casi nunca o nunca Menú desplegable: Menos de 5 minutos al día Entre 5 a 15 minutos al día/ Entre 15 a 30 minutos al día/ Entre 30 minutos y 1 hora al día/ Entre 1 a 2 horas al día/ Entre 2 a 4 horas al día/ La mayor parte del día (+4 horas)/ Casi nunca o nunca la cierro por completo, ni siquiera por la noche	Horario ventilación natural
Sección 6: Energía	Q59	En promedio, ¿Cuánto gasta mensualmente durante los MESES DE VERANO en leña?	No paga por el servicio Menos de \$10.000 /\$11.000- \$20.000 /\$21.000-\$30.000 /\$31.000 - \$40.000 /\$41.000 - \$50.000 /\$51.000 - \$60.000 /\$61.000 - \$70.000 /\$71.000 - \$80.000 /\$81.000 - \$90.000/ \$91.000 - \$100.000/ Más de \$100.000	Consumo Real
	Q67	En promedio, ¿Cuánto gasta mensualmente durante los MESES DE INVIERNO en leña?	No paga por el servicio Menos de \$10.000 /\$11.000- \$20.000 /\$21.000-\$30.000 /\$31.000 - \$40.000 /\$41.000 - \$50.000 /\$51.000 - \$60.000 /\$61.000 - \$70.000 /\$71.000 - \$80.000 /\$81.000 - \$90.000/ \$91.000 - \$100.000/ Más de \$100.000	Consumo Real
Sección 9: Calefacción y enfriamiento	Q89	¿Cuáles de los siguientes sistemas utiliza principalmente para calefaccionar su vivienda?	No dispongo de calefacción Chimenea, estufa, calefactor o algún otro artefacto Calefacción central (radiadores) o aire acondicionado Chimenea, estufa, calefactor o algún otro artefacto Calefacción central (radiadores) o aire acondicionado	Consumo Real
	Q92	¿Qué combustibles o fuente de energía usa la estufa en su vivienda? Elige tantas opciones como desees	Gas por cañería, gas en balones, leña, parafina, pellets, otro	Consumo Real
	Q93	¿La estufa es de tiro forzado?	Sí, No, No lo sé	Coefficiente de Rendimiento
	Q97	¿Durante cuáles meses utiliza el artefacto para calefaccionar su vivienda?	Menú desplegable con todos los meses del año	Horario de Calefacción
	Q98	Durante esos meses, en promedio ¿Cuánto tiempo al día	Todo el tiempo (día y noche) Todo el día	Horario de Calefacción

Capítulo 3. Metodología

		suele usar el artefacto para calefaccionar?	3 - 6 horas al día 1 - 3 horas al día Menos de 1 hora al día	
Sección 10: Temperatura interior y confort	Q105	¿Cuáles de los siguientes sistemas utiliza principalmente para enfriar su vivienda?	Ninguno, ventilador u otro artefacto, aire acondicionado.	Horario de Refrigeración
	Q107	¿Durante cuáles meses utiliza el ventilador o artefacto para enfriar su vivienda?	Menú desplegable con todos los meses del año	Horario de Refrigeración
	Q108	Durante esos meses, en promedio ¿Cuánto tiempo al día suele usar el ventilador o artefacto para enfriar la vivienda?	Todo el tiempo (día y noche) Todo el día 3 - 6 horas al día 1 - 3 horas al día Menos de 1 hora al día	Horario de Refrigeración
Sección 11: iluminación	Q119	¿Qué tipo de ampolleta usa en la mayoría de las habitaciones?	Incandescente, Halógena, Fluorescente, LED	Carga interna de iluminación
	Q120	¿Aproximadamente cuántas horas al día permanecen encendidas las luces en las siguientes habitaciones? Dormitorio, living, comedor, cocina, baños	Opciones: No hay luces, menos de 2 hrs al día, entre 2 y 5 hrs al día, más de 5 horas al día	Horario de ocupación de iluminación

El levantamiento de datos realizado en la comuna de Mulchén, se ejecutó de manera presencial entre los meses de julio y septiembre de 2022, compuesto por un equipo de 3 personas incluyendo al coordinador. El equipo de encuestadores fue capacitado previamente respecto de los objetivos del estudio, protocolos e instrumentos a aplicar. El grupo de personas contaba con experiencia en la aplicación de encuestas y no relacionadas al área de estudio, permitiendo controlar posibles sesgos.

Previo al trabajo de campo, se tomó contacto con el representante de la región del PCBE del Ministerio de Energía, para coordinar en conjunto con la Municipalidad de Mulchén a través del SECPLAN, reuniones con las Juntas Vecinales, con la intención de retomar contacto con los beneficiarios del año 2018 y presentarles el estudio. Con la ayuda municipal se logró contactar a las 147 familias vía telefónica, informándoles sobre la investigación y la posterior visita de los encuestadores. Finalmente, los encuestadores coordinaron la aplicación de las encuestas con 93 familias beneficiadas del programa estatal, accediendo a entregar datos de forma voluntaria, confidencial y gratuita para el desarrollo del presente estudio.

Capítulo 3. Metodología

3.4. Simulación

En la siguiente etapa, se realizó el modelo de diseño inicial de la investigación, utilizando el software de simulación DesignBuilder Versión 6.1.0.006, el cual utiliza el motor de cálculo del EnergyPlus desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE por sus siglas en inglés) basado en el diseño arquitectónico de las viviendas levantadas terreno como se muestra en la Figura 3-5.



Figura 3-5 Fotografía de Fachada vivienda tipo levantada en la comuna estudio de Mulchén. Fuente: Elaboración propia

3.4.1. Modelación Caso Base

Los primeros parámetros que se utilizaron como base para el desarrollo del caso de estudio, fueron las características arquitectónicas y materialidades identificadas en las Encuestas, obteniendo como caso, una vivienda aislada de un piso con estructura en madera con una superficie entre los 50 y 100 m². Esta tipología arquitectónica, que se identificó como Caso Base, y sirvió de ejemplo en su forma para todos los casos simulados.

Por otra parte, para el diseño de la tipología, se consideró la caracterización propuesta en el “Estudio para caracterizar el parque construido de viviendas hasta el año 2018, en función de los principales parámetros que influyen en su demanda de energía”, Minvu (2021) que, según los parámetros descritos anteriormente, correspondería a la Tipología N°5 o CA5 del Estudio, como se muestra en la Figura 3-6.

Capítulo 3. Metodología



Figura 3-6 Ficha de Tipología N°5 CA5, Estudios de caracterización de viviendas

La tipología seleccionada se conforma de 3 dormitorios, 2 baños, estar comedor y cocina, con una superficie de 58,8 m², de acuerdo a las condiciones más reiteradas del estudio de campo presentes en las preguntas Q25-27 y resultando en el diseño presentado en la Figura 3-7.

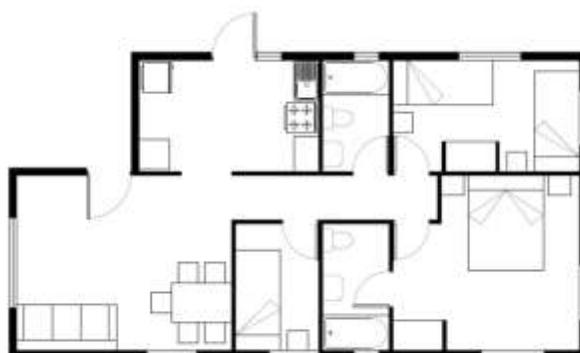


Figura 3-7 Planta arquitectónica del Caso Base. Fuente: Elaboración propia

Una vez levantada la modelación en el programa de simulación como se muestra en la Figura 3-8, se procedió a la calibración de las variables que se definieron de acuerdo a los datos objetivos de los estándares normativos detallados en la Tabla 4-8 y según las condiciones arquitectónicas de la Tipología propuesta y el entorno estudiado. La introducción de estos valores se realizó de manera sistemática en los diferentes apartados del programa y según cada parámetro, agrupándose en las siguientes secciones: Sitio, Actividad, Cerramientos, Aberturas, Iluminación y HVAC, concluyendo

Capítulo 3. Metodología

en los resultados de consumo arrojados en la sección de Simulación, a través del motor de cálculo EnergyPlus.

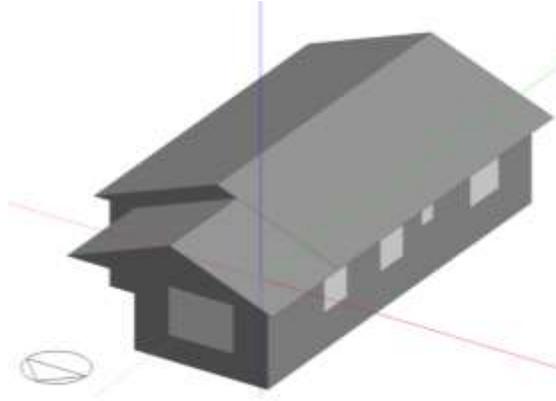


Figura 3-8 Vista Isométrica del Caso Base en DesignBuilder. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4. Resultados

Capítulo 4. Resultados

4.1. Levantamiento de variables y valores

Los primeros resultados de la investigación están relacionados con la identificación de variables que se relacionan con el desempeño térmico de la vivienda, analizado en el estado del arte y los estándares normativos locales, incluyendo al final del apartado los valores asignados a los parámetros resultantes en el Caso Base y Caso Construido.

4.1.1. Estado del arte

Muchos autores coinciden en cuáles son las variables que más afectan sobre el confort térmico de la vivienda, tanto en la etapa de diseño, construcción y operación, y cuáles deben ser los parámetros a considerar para calcular el consumo energético. A continuación, se muestra el resultado de un análisis realizado a varios estudios levantados de acuerdo a la metodología descrita en el título 3.2.1, sintetizado en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Levantamiento de variables que impactan sobre el consumo energético según la literatura

Fuente	Variables				
	Envolvente	Sistemas y equipos	Operación y mantenimiento	Comportamiento del usuario	Calidad ambiental interior
(Bustamante W et al., 2009)	X	X	X	X	X
(Alexis Pérez-Fargallo et al., 2017)	X		X	X	X
(van den Brom et al., 2018)	X	X	X		X
(A. Pérez-Fargallo et al., 2018)	X	X	X		
(Azar et al., 2020)	X	X	X	X	X
(Geraldi & Ghisi, 2020)	X	X	X	X	X
(Jain et al., 2020)		X	X	X	
(Hu et al., 2020)	X	X	X	X	X
(Pereira-Ruchansky & Pérez-Fargallo, 2020)	X	X		X	X

Capítulo 4. Resultados

Los resultados de la tabla son coincidentes en la mayoría de las variables que impactan sobre el consumo energético de las viviendas, obteniendo 8 de 9 similitudes de estudios en la mayoría de las variables a excepción de la Calidad ambiental interior y la Operación y mantenimiento. Las cuales, sin embargo, están presente en más de la mitad de las investigaciones y, por lo tanto, la podemos incluir cómo un parámetro que se relaciona directamente con el consumo energético.

4.1.2. Estándar de Construcción Sustentable para Viviendas

Para determinar las demandas energéticas, los Estándares plantean dos opciones; un uso de plantillas de balance térmico dinámico (PBDT) de la Calificación Energética de Viviendas o el uso de un software de simulación energética de libre elección, siendo uno de los referenciados el DesignBuilder. Esta última opción fue la tomada para desarrollar la investigación en base a las consignas que se pueden calibrar en el modelo y se describen a continuación.

Variable 00 Transmitancia térmica de la Envolvente. El objetivo principal de la investigación es identificar y medir el impacto de las variables asociado a la BDE, sin embargo, se decidió por omitir la variable de la Envolvente térmica, ya que se priorizaron aquellas variables sobre las cuales se tiene menor conocimiento y aportaran una mayor innovación. Por lo tanto, en las simulaciones se ocuparon los datos de transmitancia térmica de la envolvente levantados en terreno que se describen en la Tabla 4-9 y no los que exige el Estándar para la Zona F. No obstante, a continuación se describen los valores a modo de referencia, para tener en consideración las mejoras de aislación que se proponen en el Estándar a diferencia de lo levantado en terreno y la RT actual.

Tabla 4-2 Valores de Transmitancia Térmica U [W/(m2K)] y Resistencia Térmica (R100)

ZONA TÉRMICA	F
Techos	0,28
Muros	0,45
Pisos ventilados	0,50
Pisos sobre terreno - R100 [(m2K)/W]*100	91
Puertas	1,70

Fuente: Estándar de Construcción Sustentable de Viviendas, 2018.

Tabla 4-3 Valores de Transmitancia Térmica para envolvente transparente, según Zonas Térmicas

ZONA TÉRMICA	F
Valores-U[W/(m2K)]	3,0

Fuente: Estándar de Construcción Sustentable de Viviendas, 2018.

Capítulo 4. Resultados

Variable 01 Infiltraciones. La clase de Infiltración al aire máxima permitida para la envolvente térmica de las edificaciones, en el caso de la región del Biobío, será de **8,00 ac/h at 50Pa**.

Variable 02 Archivo climático. El primer factor que se establece, es la utilización de un Archivo climático con formato Energy Plus Weather (. epw), disponibles de forma gratuita en el sitio web csustentable.minvu.gob.cl. En la plataforma sólo hay 20 archivos para todo el país, teniendo que utilizar el más cercano al área de estudio que es **Concepcion-Estaciones.epw**.

Variable 03 Temperatura de Suelo. Está variable no es considerada en el Estándar.

Variable 04 Límite de Calefacción y Refrigeración. El cálculo de demanda energética para enfriamiento y calefacción, deberá realizarse considerando los límites de temperatura mensuales, determinadas en base al método de confort adaptativo de (Dear & Richard Brager, 1998) señalado en ASHRAE Fundamentals, capítulo "Thermal Comfort", aplicando una banda de +2,5 °C a -2,5 °C, con respecto de la temperatura media de confort. La demanda térmica será calculada para alcanzar los niveles de confort de manera permanente, independiente del horario real de uso la vivienda.

Tabla 4-4 Temperaturas mensuales para cálculo de demanda de Calefacción y Enfriamiento

Límites para Calefacción y Enfriamiento			
Zona térmica		F	Unidad
Ene	Calefacción	20,9	°C
	Enfriamiento	25,9	°C
Feb	Calefacción	20,8	°C
	Enfriamiento	25,8	°C
Mar	Calefacción	20,3	°C
	Enfriamiento	25,3	°C
Abr	Calefacción	19,5	°C
	Enfriamiento	24,5	°C
May	Calefacción	19,0	°C
	Enfriamiento	24,0	°C
Jun	Calefacción	18,4	°C
	Enfriamiento	23,4	°C
Jul	Calefacción	18,3	°C
	Enfriamiento	23,3	°C
Ago	Calefacción	18,5	°C
	Enfriamiento	23,5	°C
Sep	Calefacción	18,9	°C
	Enfriamiento	23,9	°C
Oct	Calefacción	19,4	°C
	Enfriamiento	24,4	°C
Nov	Calefacción	19,9	°C

Capítulo 4. Resultados

	Enfriamiento	24,9	°C
Dic	Calefacción	20,5	°C
	Enfriamiento	25,5	°C

Fuente: Estándar de Construcción Sustentable de Viviendas, 2018.

Variable 05 Ventilación Natural. la ventilación natural para reducción de temperatura, por concepto de apertura de ventanas o puertas, según los ECSV podrá ser configurada como una tasa de **3 RAH**.

Variable 06 Coeficiente de rendimiento. Está determinado por la Tabla 4-5 de valores internas, de acuerdo a la fuente de energía y los diferentes tipos existentes. Solo se podrán especificar calefactores a leña eficientes o a pellet en zonas rurales o viviendas sociales en zonas autorizadas bajo las condiciones técnicas que se indican en la metodología del ECSV. La cual especifica que, para otras tecnologías, se deberá demostrar un **rendimiento por sobre 1** y que el sistema cumpla con el requerimiento de Calidad de Aire Interior, de la Categoría Salud y Bienestar y el requerimiento de la Categoría Impacto ambiental.

Tabla 4-5 Rendimientos generales mínimos de los equipos de calefacción

Rendimientos mínimos	Rendimiento base	Rendimiento óptimo	Unidad
Caldera a gas de condensación solo calefacción	1,0	1,0	Rendimiento promedio PCI
Bomba de calor suelo - aire o suelo agua	3,1	4,0	COP modo calefacción
Bomba de calor agua - agua o agua - aire	3,6	4,0	COP modo calefacción
Bomba de calor aire - agua o aire - aire	3,2	4,0	COP modo calefacción
Caldera mixta de condensación	1,0	1,0	Rendimiento promedio PCI
Caldera biomasa	0,9	0,9	Rendimiento promedio PCI
Caldera a gas para calefacción	0,9	0,9	Rendimiento promedio PCI

Fuente: Estándar de Construcción Sustentable de Viviendas, 2018.

Variable 07 Carga interna de iluminación. Se deberán considerar **1,5 W/m²** de potencia instalada, con un horario de encendido y apagado de luces creados por región, para distintos meses del año.

Variable 08 Horario de ocupación de iluminación. En la Tabla 4-6 se presentan los horarios detallados del encendido de luces para el caso de la región del Biobío.

Capítulo 4. Resultados

Tabla 4-6 Horarios de encendido de luces interior de la vivienda

	Horario desde - hasta				
	Ene-Feb	Mar-Abr	May-Ago	Sep-Oct	Nov-Dic
	GMT-3	GMT-3	GMT-4	GMT-3	GMT-3
Biobío	21-22	7-8 / 20-22	7-8 / 18-22	7-8 / 20-22	21-22

Fuente: Estándar de Construcción Sustentable de Viviendas, 2018.

Variable 09 y 10 Horario de activación de calefacción y refrigeración. La demanda térmica será calculada para alcanzar los niveles de confort de manera permanente, independiente del horario real de uso la vivienda.

Variable 11 Horario de ventilación natural. Entre las 22 y 6 horas y cuando la temperatura exterior supere los 15°C.

Variable 12 Número de personas. Se utilizarán con una ocupación en concordancia con la NCh 3308:2013, la cual determina un mínimo de dos personas, más una por cada dormitorio.

Variable 13 y 14 Índice Metabólico y Horario de cargas internas. Las personas calculadas en la variable 12 proporcionarán una carga sensible de 98,4 W durante el día (7 a 22 horas) y 82 W durante la noche (22 a 7 horas).

Como resultado del análisis de parámetros a considerar para el cálculo el desempeño energético de las viviendas según los estándares, se presenta la Tabla 4-7, con las variables a utilizar, agrupadas en las categorías presentadas en el estudio de la literatura levantado en la Tabla 4-1.

Tabla 4-7 Variables asociadas al desempeño energético

		Variable	Unidad
V00	Envolvente	Transmitancia térmica de Muros	W/m ² -K
V00		Transmitancia térmica de Cubierta	W/m ² -K
V00		Transmitancia térmica de Suelo / Losa	W/m ² -K
V00		Transmitancia térmica de Acristalamiento	W/m ² -K
V00		Transmitancia térmica de Puertas	W/m ² -K
V01		Infiltraciones	ac/h at 50Pa
V02	Clima	Archivo Climático	°C
V03		Temperatura de Suelo	-
V04	Calidad ambiental interior	Límite Calefacción y Refrigeración	°C
V05		Ventilación Natural	ACH
V06	Sistemas y Equipos	Coefficiente de rendimiento	COP
V07		Carga interna de iluminación	W/m ²

Capítulo 4. Resultados

V08	Comportamiento del ocupante	Horario de ocupación de iluminación	Horas al día
V09		Número de personas	Personas
V10		Horario de act. de calefacción	Horas al año
V11		Horario de act. de refrigeración	Horas al año
V12		Horario de ventilación natural	Horas al día
V13		Índice Metabólico	W/per
V14		Horario cargas internas	Horas al día

Al tener desarrollada la tabla de variables asociadas al desempeño energético, se procede a llenar con los datos levantados de los ECSV, y crear el Caso Base.

Tabla 4-8 Variables asociadas al desempeño energético. Caso Base

		Variable	Unidad	Datos
V01	Envolvente	Infiltraciones	ac/h at 50Pa	8,0
V02	Clima	Archivo Climático	°C	Tmín. 5,1- Tmáx. 22,2
V03		Temperatura de Suelo	-	-
V04	Calidad ambiental interior	Límite Calefacción y Refrigeración	°C	T° mensuales basado en confort adaptativo ASHRAE, banda +2,5°C a -2,5°C
V05		Ventilación Natural	ACH	3,0
V06	Sistemas y Equipos	Coeficiente de rendimiento	COP	1
V07		Carga interna de iluminación	W/m ²	1,5
V08	Comportamiento del ocupante	Horario de ocupación de iluminación	Horas al día	3,0
V09		Número de personas	Personas	5,0
V10		Horario de act. de calefacción	Horas al año	8.760,0
V11		Horario de act. de refrigeración	Horas al año	8.760,0
V12		Horario de ventilación natural	Horas al día	8,0
V13		Índice Metabólico	W/per	98,4
V14		Horario cargas internas	Horas al día	24,0

4.1.3. Caso Construido

Siguiendo con el ejemplo asociado a las variables descritas en la Tabla 4-7, se procedió con el levantamiento de datos para obtener la simulación del Caso Construido y así poder comparar los Casos bajo los mismos parámetros, considerado como una etapa de operación.

Capítulo 4. Resultados

Variable 00 Transmitancia térmica de la Envolvente. Estos valores son los mismos que se utilizaron para el Caso Base y los demás Casos, sin embargo, es un dato necesario de conocer para ingresar debidamente las capas de cada elemento en las simulaciones, tal como se describen en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9 Valor U, Transmitancia térmica de la envolvente

Variable	Elemento	capas int / ext	espesor	Unid ad	valor U	Unida d
V00	Muros	Placa yeso cartón	10,0	mm	3,4	W/m ² - K
		Tablero de OSB	9,5	mm		
		Entablado de Madera	2,5	mm		
V00	Cubierta	Playa yeso cartón	10,0	mm	4,1	W/m ² - K
		Tablero de OSB	9,5	mm		
V00	Suelo / Losa	Piso de madera	2,5	mm	1,5	W/m ² - K
		Radier de hormigón	80,0	mm		
		Arena	100,0	mm		
V00	Acrilami ento	Vidrio simple genérico	3,0	mm	5,9	W/m ² - K
V00	Puertas	Madera	45,0	mm	2,5	W/m ² - K

Variable 01 Infiltraciones. Este valor no fue posible extraerlo de las viviendas, por la complejidad y costos que significaban, no obstante, existen estudios como el Manual de Hermeticidad al Aire en Edificaciones del Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción (Kelly, 2014), que detalla otros valores de infiltración de aire no deseado a diferencia del estándar y que lo considera a través de otros parámetros, por ejemplo, con el tipo de materialidad de la vivienda. Las encuestas levantadas en la comuna estudio, arrojaron como el caso más representativo, las viviendas con Entramados de Madera, cuyo valor en el Manual es de **24,6 ac/h at 50Pa**.

Variable 02 Archivo climático. Se utilizaron los datos de la **Estación Meteorológica Human**, correspondiente la fuente climática más cercana a la comuna de Mulchén, ubicada a 25 km del centro de la ciudad. Los valores de la Estación, pertenecen a la Red Agrometeorológica del Instituto de Investigación Agropecuarias (INIA), obteniendo; temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica y temperatura de superficie en formato Excel. Los cuales posteriormente fueron traspasados al programa Climate Consult versión 6.0.15, transformando todos los valores a un único archivo climático en formato (. epw) con el cual se pudo trabajar en el simulador DB.

Capítulo 4. Resultados

Variable 03 Temperatura de Suelo. Esta variable se incluyó en el Caso Construido por tratarse de un aporte en las simulaciones e ir acercándose más a las realidades del entorno de acuerdo al estudio de (Pereira-Ruchansky & Pérez-Fargallo, 2020). Aunque estos valores no pudieron ser aportados en terreno, la temperatura del suelo se validó en el modelo con la herramienta **Ground Domain (GD)** en el DB que se asocia a la temperatura de la variable anterior, teniendo en cuenta un **Suelo a base de Gravilla**, característico de la zona, con una conductividad de 0,5 W/m K, un peso específico de 184,0 J/kg-K, una densidad de 2.050,0 kg/m³, una profundidad de dominio del suelo de 10 m y un perímetro de incidencia de 5 m.

Variable 04 Límite de Calefacción y Refrigeración. El límite de activación se realizó con el método de confort adaptativo con una banda de +3,5 °C a -3,5 °C y un nivel de aceptabilidad del 80%, considerándose una opción más detallada y precisa que el estándar, además de aplicar un principio de Temperaturas de activación o desactivación en horas de funcionamiento al año, resultando en (8.760 h).

Variable 05 Ventilación Natural. Al no ser posible obtener este dato en terreno, por la complejidad y costos que significaba, se decidió por dejar el mismo valor de renovaciones de aire declarado en los ECSV de 3 RAH.

Variable 06 Coeficiente de rendimiento. Los valores de la Tabla 4-5 son claros en señalar que no existen datos relacionados con artefactos con combustión basados en leña, contrastando con el 95% de los equipos utilizados por los hogares encuestados y el 74% a nivel nacional basados en combustión a leña.

Por consiguiente, el Caso Construido adoptó el Coeficiente de rendimiento del tipo de calefactores Promedio que usan los hogares estudiados de acuerdo a la pregunta **Q93**, una **Estufa con cámara doble a leña o con templador**, respaldado por el estudio del (CDT, 2015), con una **eficiencia de 0,7**, de acuerdo al Manual de Usuario Calefactores a Leña Bosca.

Variable 07 Carga interna de iluminación. El dato de esta variable, se pudo obtener gracias a las preguntas levantadas en la Tabla 3-1, donde se midió el promedio de la pregunta **Q119**, resultando en una potencia de **3,7 W/m²**, de acuerdo al cálculo de la Tabla 4-10.

Capítulo 4. Resultados

Tabla 4-10 Cálculo de Potencia de iluminación instalada Caso Construido

Recinto	Cantidad de luminarias	Potencia ampolleta LED W/h	Total W/h
Dormitorio ppl	2	20	40
Dormitorio 2	1	20	20
Dormitorio 3	1	20	20
Baño 1	1	20	20
Baño 2	1	20	20
Cocina	1	20	20
Comedor	1	20	20
Estar	2	20	40
Pasillos	1	20	20
Total	11		220
Superficie total vivienda tipo (m ²)			59,0
Potencia iluminación instalada (W/m ²)			3,7

Nota (1). Los recintos corresponden a la vivienda tipo levantada como Caso Base, misma vivienda del Caso Construido

Nota (2). La superficie de la vivienda corresponde a la tipología levantada como Caso Base, misma vivienda del Caso Construido

Nota (3). El valor de la potencia de la ampolleta LED se obtuvo de la Tabla *Consumo artefactos eléctricos en el hogar* del Ministerio de Energía

Variable 08 Horario de ocupación de iluminación. El horario de activación de la iluminación declarado por los habitantes de las viviendas encuestadas, estableció **2 horas y media** de encendido los 365 días del año, de acuerdo al Promedio resultante de la pregunta **Q120** de la

Tabla 3-2.

Variable 09 y 10 Horario de activación de calefacción y refrigeración. El perfil de horario de activación de calefacción para el Caso Construido, se resume en la cantidad de horas declaradas en las encuestas y el momento exacto de encendido durante el día según el perfil Week CM (día de semana en mes frío) de acuerdo a la Figura 3-4, con un periodo que se detalla a continuación en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11 Horario de activación de Calefacción según Encuestas y Estudio

	Horario desde - hasta			
	Mar-Abr GMT-3	May-Ago GMT-4	Sep GMT-3	Oct GMT-3
Encuestas	6-9 / 17-23	6-9 / 17-24	6-9 / 17-23	6-9 / 17-24

Nota (1). El horario de activación señalado es coincidente con la cantidad de horas declaradas en las Encuestas.

Para el caso del perfil de activación de la refrigeración, se detalla el uso declarado en las encuestas, según la Moda de las preguntas **Q105, 107 y 108**, representado en la Tabla 4-12.

Capítulo 4. Resultados

Tabla 4-12 Horario de activación de Refrigeración

Horario desde - hasta		
	Ene - Feb	Dic
	GMT-3	GMT-3
Encuestas	12-17	12-17

Nota (1). El horario de activación propuesto es coincidente con la cantidad de horas declaradas en las Encuestas.

Variable 11 Horario de ventilación natural. Para la Ventilación Natural no se producen grandes diferencias en la cantidad de horas de aperturas entre los Estándares y las Encuestas, con sólo una brecha **de 2 horas al día**, según la Moda levantada de las preguntas **Q50-52**.

Tabla 4-13 Horario de activación de Ventilación Natural

Horario desde - hasta					
	Ene - Mar	Abr	May-Ago	Sep	Oct-Dic
	GMT-3	GMT-3	GMT-4	GMT-3	GMT-3
Encuestas	8-10 / 16-19	8-9	8-9	8-9	8-10 / 16-19

Nota (1). El horario de activación propuesto es coincidente con la cantidad de horas declaradas en las Encuestas.

Variable 12 Número de personas. De acuerdo a las encuestas, el Promedio de habitantes por vivienda es de **3 personas**, según la pregunta **Q14** de la

Tabla 3-2.

Variable 13 y 14 Índice Metabólico y Horario de cargas internas. Los valores de estas dos variables no fue posible obtenerlo en terreno, por lo tanto, se utilizaron los valores y horarios propuestos por el estándar, con una carga sensible de **98,4 W** durante el día (7 a 22 horas) y **82 W** durante la noche (22 a 7 horas).

Para resumir los valores de las variables descritas recientemente, se presenta la Tabla 4-14 como el Caso Construido, siguiendo el esquema desarrollado en la Tabla 4-7.

Tabla 4-14 Variables asociadas al desempeño energético. Caso Construido

	Variable	Unidad	Datos
V00	Transmitancia térmica de Muros	W/m ² -K	3,4
V00	Transmitancia térmica de Cubierta	W/m ² -K	4,1
V00	Transmitancia térmica de Suelo / Losa	W/m ² -K	1,5
V00	Transmitancia térmica de Acristalamiento	W/m ² -K	5,9
V00	Transmitancia térmica de Puertas	W/m ² -K	2,5
V01	Infiltraciones	ac/h at 50Pa	24,6

Capítulo 4. Resultados

V02	Clima	Archivo Climático	°C	Tmín. 3,8 – Tmáx. 29,3
V03		Temperatura de Suelo	°C	Tmín. 3,8 – Tmáx. 29,3
V04	Calidad ambiental interior	Límite Calefacción y Refrigeración	°C	T° diarias basado en confort adaptativo, banda +3,5°C a -3,5°C
V05		Ventilación Natural	ACH	3
V06	Sistemas y Equipos	Coeficiente de rendimiento	COP	0,7
V07		Carga interna de iluminación	W/m ²	3,7
V08	Comportamiento del ocupante	Horario de ocupación de iluminación	Horas al día	2,5
V09		Número de personas	Personas	3,0
V10		Horario de act. de calefacción	Horas al año	2.359,0
V11		Horario de act. de refrigeración	Horas al año	364,0
V12		Horario de ventilación natural	Horas al día	3,0
V13		Índice Metabólico	W/per	98,4
V14		Horario cargas internas	Horas al día	24,0

4.2. Medición del impacto de las variables

Al tener identificadas las variables asociadas al desempeño energético de la vivienda y los valores para el Caso Base y Caso Construido, es necesario analizar cómo impactan una por una de esas variables y así conocer la dimensión de forma individual. No obstante, es importante conocer antes, la variable dependiente del Consumo energético de calefacción del caso estudiado.

4.2.1. Consumo Energético de Calefacción

El consumo energético de calefacción resultante de las encuestas, es de un gasto de Moda mensual de \$40.000 en leña, entre los meses de marzo a octubre, con un tiempo de encendido de casi 9 horas diarias, ver Tabla 4-11. Con esos datos, más otros valores aportados por el estado del arte, se pudo calcular el Consumo Real.

Tabla 4-15 Cálculo de consumo energético de calefacción anual Caso Real

	Gasto mensual de leña para calefacción (\$)	Meses de encendido del equipo	Precio de venta 1m ³ (\$)	Consumo de leña al mes (m ³)	Consumo de leña anual (m ³)	Energía contenida en 1m ³ de Leña con humedad al 40% (kWh)	Consumo Energético de Calefacción (kWh/año)
Valor	40.000	Mar - Oct	50.000	0,8	6,4	1.155,0	7.392,0
fuentes	Encuestas	Encuestas	Reporte de leña de la Araucanía	Cálculo	Cálculo	Calculadora Biomasa del Ministerio de Energía	Cálculo

De acuerdo al cálculo de la Tabla 4-15, el consumo energético de calefacción anual para el Caso Real es de **7.392,0 kWh/año**. Valor que se respalda con el consumo promedio de energía de leña en

Capítulo 4. Resultados

los hogares de la región del Biobío de **7.138 kWh/año** según (CDT, 2015), y con un porcentaje de uso del combustible de 73,7% del total del parque viviendas.

4.2.2. Simulación de variables

Para concluir el estudio comparativo del impacto de las variables sobre el CEC, se dejarán de lado los parámetros del Índice Metabólico y los Horarios de carga interna, por no poder levantar los datos en terreno, homologando, por lo tanto, los valores del Estándar. De esta forma, se concluye el análisis con las 11 variables presentes en la Tabla 4-16.

Tabla 4-16 Comparación de variables asociadas a la brecha de desempeño, Caso Base vs Caso Construido

		Variable	Unidad	Datos Caso Base	Datos Caso Construido	Diferencia
V01	Envolvente	Infiltraciones	ac/h at 50Pa	8,0	24,6	16,6
V02	Clima	Archivo Climático	°C	Tmín. 5,1- Tmáx. 22,2	Tmín. 3,8 – Tmáx. 29,3	Tmín. 1,3 – Tmáx. 7,0
V03		Temperatura de Suelo	°C	-	Tmín. 3,8 – Tmáx. 29,3	Tmín. 3,8 – Tmáx. 29,3
V04	Calidad ambiental	Límite Calefacción y Refrigeración	°C	T° mensuales basado en confort adaptativo ASHRAE, banda +2,5°C a -2,5°C	T° diarias basado en confort adaptativo, banda +3,5°C a -3,5°C	-
V06	Sistemas y Equipos	Coeficiente de rendimiento	COP	1,0	0,7	0,3
V07		Carga interna de iluminación	W/m²	1,5	3,7	2,2
V08	Comportamiento del Ocupante	Horario de ocupación de iluminación	Horas al día	3,0	2,5	-0,5
V09		Número de personas	Personas	5,0	3,0	-2,0
V10		Horario de act. de calefacción	Horas al año	8.760,0	2.359,0	-6.401,0
V11		Horario de act. de refrigeración	Horas al año	8.760,0	364,0	-8.396,0
V12		Horario de ventilación natural	Horas al día	8,0	3,0	5,0

Es importante poder comparar los valores antes de la simulación, y obtener un primer diagnóstico de las diferencias entre el Caso Base y el Caso Construido. Una de ellas, por ejemplo, es la gran disparidad, incluso por sobre los 7 grados en las temperaturas máximas entre los archivos climáticos, otros valores que resaltan en la comparación, fueron las infiltraciones con diferencias de 16 ac/h at 50Pa, los Horarios de activación de la calefacción y refrigeración y los Límites de calefacción y

Capítulo 4. Resultados

refrigeración que están directamente relacionado con el Comportamiento del Ocupante. Por último, el Coeficiente de rendimiento de los equipos de calefacción y refrigeración.

Tabla 4-17 Medición del impacto de las variables del Caso Construido sobre el Consumo anual de Calefacción Caso Base

CASO	Variable que se modifica por Caso Construido	Unidad	Nuevo valor de variable	Fuente	Consumo en (kWh/m ² año)	Consumo en (kWh)	Dif. con Caso Base (%)
BASE					218,6	12.853,1	
CA1.1	V01	ac/h at 50Pa	24,6	CITEC	265,9	15.632,0	+21,6%
CA1.2	V01	ac/h at 50Pa	(1) 8,0	CITEC	218,6	12.853,1	0,0%
CA2	V02	°C	Tmín. 3,8 – Tmáx. 29,3	Red Meteorológica INIA	241,7	14.213,7	+10,6%
CA3	V03	°C	Tmín. 3,8 – Tmáx. 29,3	Red Meteorológica INIA	192,0	11.289,6	-12,2%
CA4	V04	°C	T° diarias basado en confort adaptativo, banda +3,5°C a -3,5°C	ASHRAE-55 2017	169,73	9.980,1	-22,4%
CA5.1	V06	COP	0,7	Manual de Usuario Calefactores	305,5	17.963,4	+39,8%
CA5.2	V06	COP	(2) 0,8	CDT	275,79	16.216,5	+26,2%
CA6	V07 + V08	W/m ² - Horas al día	4,4 - 3,0	Encuestas	218,9	12.870,7	+0,1%
CA7	V09	Personas Horas al año -	3,0	Encuestas	232,6	13.675,7	+6,4%
CA8	V10+V11+V12	Horas al año - Horas al día	2.359,0 - 364,0 - 3,0	Encuestas	122,4	7.195,4	-44,0%

Nota(1). Este valor corresponde al requisito de hermeticidad al aire de la ciudad de Los Ángeles, sacado del Manual de Hermeticidad al Aire en Edificaciones, CITEC (2014), cuyo valor coincide con el ECSV.

Nota(2). Este valor corresponde a una eficiencia para calefactores de leña por recambio de artefactos como programa ministerial, con Clasificación B según (CDT, 2015).

El estudio del impacto de las variables sobre el Consumo energético anual de calefacción sobre el Caso Base, concluyó en 8 Casos simulados, de los cuales dos, se analizaron con una variación. Esta diferencia de porcentaje de consumo, se midió simulando el Caso Base ajustando sólo una o más variables por Caso y de forma independiente. Con estos resultados fue posible identificar cuáles son las variables que se asocian a la brecha de desempeño en los hogares vulnerables. Los Casos CA1.1,

Capítulo 4. Resultados

CA5.1 y CA5.2 fueron los que generaron un aumento más significativo en el Consumo energético, el primero asociado a la variable V01 “Infiltraciones” con un aumento casi del 22% y los Casos CA5.1 /CA5.2 que ajustaron la variable V06 “Coeficiente de Rendimiento del Equipo” a un COP de 0,7 y 0,8 respectivamente, produciendo un 39,8% y 26,2% de brecha de consumo por sobre el valor del Caso Base. Por otro lado, los Casos que produjeron las mayores disminuciones en el Consumo de Calefacción fueron, el Caso CA4 que modificó el Límite de Calefacción y Refrigeración (V04) a temperaturas diarias en base al modelo de confort adaptativo ASHRAE-55 2017 con banda +3,5°C a -3,5°C, llegando a reducir en un 22% el consumo. Finalmente, en el Caso CA8 se ajustaron las variables V10, V11 y V12 adoptando los Horarios de activación levantados en terreno, provocando una reducción del 44% del consumo de calefacción, lo que está directamente relacionado con el Comportamiento del Ocupante.

Tabla 4-18 Medición del impacto de las variables del Caso Construido sobre el Consumo anual de Calefacción Caso Real

CASO	Variable que se modifica respecto del Caso Base	Unidad	Nuevo valor de variable	Fuente	Consumo en (kWh/m2 año)	Consumo en (kWh)	Dif. con Caso Real (%)
REAL					132,5	7.792,0	
CA9.1	V01	ac/h at 50Pa	24,6	CITEC	265,9	15.632,0	+100,6%
CA9.2	V01	ac/h at 50Pa	(1) 8,0	CITEC	218,6	12.853,1	+65,0%
CA10	V02	°C	Tmín. 3,8 – Tmáx. 29,3	Red Meteorológica INIA	241,7	14.213,7	+82,4%
CA11	V03	°C	Tmín. 3,8 – Tmáx. 29,3	Red Meteorológica INIA	192,0	11.289,6	+44,9%
CA12	V04	°C	T° diarias basado en confort adaptativo, banda +3,5°C a -3,5°C	ASHRAE-55 2017	169,73	9.980,1	+28,1%
CA13.1	V06	COP	0,7	Manual de Usuario Calefactores	305,5	17.963,4	+130,5%
CA13.2	V06	COP	(2) 0,8	CDT	275,79	16.216,5	+108,1%
CA14	V07 + V08	W/m2 - Horas al día	4,4 - 3,0	Encuestas	218,9	12.870,7	+65,2%
CA15	V09	Personas	3,0	Encuestas	232,6	13.675,7	+75,5%
CA16	V10+V11+V12	Horas al año - Horas al día	2.359,0 - 364,0 - 3,0	Encuestas	122,4	7.195,4	-7,7%

Capítulo 4. Resultados

Nota(1). Este valor corresponde al requisito de hermeticidad al aire de la ciudad de Los Ángeles, sacado del Manual de Hermeticidad al Aire en Edificaciones, CITEC (2014), cuyo valor coincide con el ECSV.

Nota(2). Este valor corresponde a una eficiencia para calefactores de leña por recambio de artefactos como programa ministerial, con Clasificación B según (CDT, 2015).

De igual manera que en la tabla anterior, se calculó el impacto de las variables, pero en este escenario sobre el consumo energético anual del Caso Real. Fue fundamental realizar este análisis, para ir acercándose a los motivos por los cuales se está produciendo la Brecha. Es necesario señalar que en este análisis se trabajó sobre con el modelo del Caso Base "*Variables del ECSV*", ajustando sólo una o más variables por Caso y de forma independiente al igual que la Tabla 4-17, concluyendo en 8 casos, de los cuales 2 tienen una variación. El aumento del consumo de calefacción es sustancialmente significativo en la mayoría de los casos a diferencia de la tabla anterior, obteniendo porcentajes por sobre el doble del consumo real en CA9.1 ajustando las Infiltraciones, CA13.1 y CA13.2 modificando el Coeficiente de rendimiento del equipo, sin embargo hay una sola simulación que disminuye su consumo de calefacción con respecto del Caso Real, acortando la brecha a un solo 7,7% que corresponde al CA16, donde se ajustan los horarios de activación de los equipos y la ventilación natural. Si bien, los resultados de la Tabla 4-18 con respecto a la Tabla 4-17 son diferentes, si coinciden en las variables que generaron un mayor impacto sobre desempeño energético, que fueron las Infiltraciones, el Rendimiento de los equipos y los Horarios de activación.

Capítulo 4. Resultados

4.3. Brecha de Desempeño Energético

Por último, se realizó la medición de la Brecha de Desempeño Energético. Para esto se utilizó como base el Consumo anual de Calefacción del Caso Real, cuyo valor fue calculado en la Tabla 4-15 y se encuentra asociado sólo al gasto monetario mensual de las familias en combustible, que si bien es un valor similar a la demanda anual de calefacción proyectada por el CEV (135,0 kWh/m² año), no hay que olvidar que esa cifra corresponde a una vivienda con envolvente inmensamente superior a las realidades de las familias levantadas.

Tabla 4-19 Medición de la Brecha de Desempeño Energético sobre el Caso Real

	Descripción	Consumo en (kWh/m ²)	Consumo anual de calefacción en (kWh)	Dif. con Caso Real (%)
CASO REAL	Corresponde al Consumo de Calefacción, calculado del gasto mensual "Moda "en leña (\$40.000) declarado en las Encuestas, a través de la calculadora de Biomasa del Ministerio de Energía.	132,5	7.792,0	
CASO BASE	Simulación en base a las variables del Estándar de Construcción Sustentable para Viviendas, de acuerdo a los valores levantados en la Tabla 4-8	218,6	12.853,1	39,4%

El Caso Base representa todos los parámetros objetivos propuestos por los Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas, considerandos en la Etapa de Diseño (Teórico) de una futura construcción, arrojando un consumo de 218,6 kWh/m² año, lo que se traduce en casi un 40% de Brecha con respecto a los 132,5 kWh/m² año del Caso Real correspondiente a la Etapa de Operación (Real). Un valor que se puede esperar, de acuerdo al aumento y disminución del consumo de las variables estudiadas en los puntos anteriores.

Capítulo 4. Resultados

Tabla 4-20 Simulación de escenarios en busca de la reducción de la BDE sobre el Caso Real

COMBINACIÓN	CASOS	Descripción	Consumo en (kWh/m ² año)	Consumo anual de calefacción en (kWh)	Dif. con Caso Real (%)
	REAL	Corresponde al Consumo de Calefacción, calculado del gasto mensual "Moda "en leña (\$40.000) declarado en las Encuestas, a través de la calculadora de Biomasa del Ministerio de Energía.	132,5	7.792,0	
COM 01	CA1.1+CA2 +CA3+CA4+ CA5.1+CA6 +CA7+CA8	Simulación ajustada a la realidad más pronta estudiada de las viviendas, de acuerdo a los datos obtenidos en el Caso Construido, según a la Tabla 4-14	186,1	10.944,4	28,8%
COM 02	CA1.2+CA2 +CA3+CA4+ CA5.1+CA6 +CA7+CA8	Simulación en busca de la disminución de la brecha de desempeño calculada en base a la Combinación anterior, ajustando sólo la Infiltración (V06) de acuerdo al CA1.2	154,2	9.069,3	14,1%
COM 03	CA1.2+CA2 +CA3+CA4+ CA5.2+CA6 +CA7+CA8	Combinación final en base a la COM 02, modificando sólo el Coeficiente de rendimiento del equipo de calefacción (V11), según el CA5.2	140,6	8.264,3	5,7%

Al resultar mayor el valor del Caso Base sobre el Caso Real, se decidió evaluar cómo disminuir el consumo y acortar más la brecha. Primero que todo, se acordó evaluar una combinación que contenga los datos resultantes del Caso Construido, ya que este escenario representa la realidad más cercana a las viviendas estudiadas. Este primer análisis significó una disminución de poco más del 10% de la Brecha, un valor consecuente con el impacto medido en la Tabla 4-17. Posteriormente, se trabajó en disminuir aquellas variables que generaban un aumento en el consumo como la Infiltración (V01) y el COP (V06), pero no así aquellas variables que ya lo disminuían, como el Límite de Calefacción y Refrigeración (V04) y las variables (V10, V11 y V12) asociadas a los horarios, ya que estas últimas variables se trataron de valores declarados por los usuarios y sería inconsecuente modificarlos. Por otra parte, la infiltración es una variable que depende de varios factores y es por esto que su condición podría ajustarse para la evaluación. De esta manera se desarrolló la combinación 2 (COM2), que mantuvo las mismas condiciones que Caso Construido (COM1), pero que sólo se ajustó la infiltración considerando el CA1.2, que establece un valor de 8 ac/h at 50Pa de acuerdo al Manual de Hermeticidad y que coincide con el valor proyectando en el ECSV, reduciendo la brecha a un 14%.

Capítulo 4. Resultados

Finalmente, en la combinación 3 (COM3), se dejaron de igual manera las variables de la COM2 y sólo se ajustó el Coeficiente de rendimiento del equipo de calefacción al valor del CA5.2 que indica un rendimiento máximo de 80% según la eficiencia para calefactores de leña por recambio de artefactos como programa ministerial, con Clasificación B, extraído del documento de la CDT, quedando de esta manera una diferencia menor del 6% entre lo simulado y el Caso real.

Capítulo 5. Discusión

Capítulo 5. Discusión

Los resultados de la investigación demostraron que existen variables que poseen un mayor impacto sobre el desempeño energético en los hogares vulnerables del centro sur de Chile, tales como la infiltración, el rendimiento de los equipos y, las consignas y horarios de uso de calefacción .

Estos hallazgos deben ser medidos con prudencia debido a las limitaciones metodológicas que podrían comprometer la validez externa. La primera limitación se debe al diseño no aleatorio de la investigación, ya que se centró en un grupo objetivo a partir de datos disponibles entregados por el PCBE, la segunda corresponde al caso de estudio seleccionado para la simulación, que, si bien es representativo a las viviendas catastradas, no es generalizable en sus resultados, ya que necesita una mayor cantidad de casos a investigar. Por último, hay que considerar las incertidumbres que poseen los modelos de predicción climática y las propias estaciones de monitoreo, para la evaluación anual de los resultados obtenidos o en proyecciones en el tiempo si se desea.

Si bien, son varios los autores que coinciden en cuáles son los parámetros que se deben considerar para realizar el cálculo del consumo energético de una vivienda, no es una receta exacta, es un problema multifactorial y depende de muchas dimensiones como lo plantea (Martínez & Kelly, 2015), no obstante, se hizo necesario partir de una base, categorizando e identificando cuales son las variables que impactan sobre el desempeño energético, de acuerdo a lo señalado en los estándares locales existentes y la literatura, tomando como ejemplo el orden planteado por (Geraldini & Ghisi, 2020), quien lo clasifica en 6 categorías y que lo podemos medir en tres etapas: diseño, construido y operativo.

Una vez obtenidas las variables de estudio, y llenado cada uno de los campos con los datos extraídos del Estándar y el trabajo en terreno, se pudo medir cual fue el impacto sobre el Caso Base a través de las simulaciones. Los resultados indicaron que, al momento de simular, las variables que más aumentaron el consumo energético de calefacción fueron la Infiltración (V06) y el Coeficiente de Rendimiento del Equipo (V11) en un 20% y 40% respectivamente. Este 20% de brecha obtenido en el parámetro de Infiltración, puede contrastar con el 60% declarado por (Figuerola et al., 2013), sin embargo, existe una semejanza en señalar que aún es una variable que provoca un gran impacto al consumo energético de la vivienda y que todavía sigue siendo complejo poder detallarla en la simulación.

Capítulo 5. Discusión

En caso contrario, hubo variables que resultaron disminuir el CEC, tales como el Límite Calefacción y Refrigeración (V04) y los Horarios de activación de equipos y ventilación (V10, V11 y V12). Estos parámetros los podemos relacionar con el Comportamiento del Ocupante, que concuerda como una de las razones más citadas en las investigaciones como la principal causante de la brecha de desempeño. (Mahdavi et al., 2021) demuestra en su revisión, que el 70% de los documentos responsabilizan al usuario como la razón más incidente de la brecha, sin embargo, sólo el 40% incluyó evidencia formal y el 14% lo hizo con datos de seguimiento detallado, pero esto no quiere decir que no tengamos que considerarlo como causa, sino que debemos poner atención a cada contexto y realidad estudiada. Por otra parte, (Zhang et al., 2018) estima que el ahorro de energía aportado en las viviendas por el comportamiento oscila entre el 10% y el 25%, en cambio (Sonderregger, 1977) en su estudio encontró una variación del 33% de consumo de calefacción, lo que contrasta con el 44% de disminución del consumo energético de calefacción que se obtuvo en la investigación, pero que se coincide con la cantidad de horas de uso que se muestra en la Tabla 4-11 en comparación con el Estándar que corresponde a un funcionamiento 24/7.

Una vez analizado el impacto de las variables sobre consumo energético de calefacción por separado, fue interesante conocer cómo se comportó la vivienda evaluando todos los parámetros de estudio, pudiendo así medir la brecha. Una investigación en Dinamarca realizada por (Kragh et al., 2017), analiza la muestra del consumo energético de más de 200 viviendas unifamiliares prácticamente nuevas y las compara con la demanda energética propuesta por los estándares locales, lo que arrojó unas desviaciones adicionales entre el 25-80%. Por otra parte, (Sunikka-Blank & Galvin, 2012) estiman que para las viviendas menos eficientes energéticamente, el consumo real de energía para calefacción es sistemáticamente más bajo que el teórico en un promedio del 30%. Y si comparamos estas cifras, con el CEC que se determinó para el Caso Base de la investigación de (218,6 kWh/m² año) versus los (132,5 kWh/m² año) del Caso Real, resultó en una BDE del casi 40%, un valor muy similar al caso de (Sunikka-Blank & Galvin, 2012), barajando la posibilidad de que se está presentado un “Efecto Preligado” en el Desempeño Energético de las viviendas investigadas.

Si deseamos reducir la brecha de desempeño, sobre todo en hogares de familias vulnerables, se debe mejorar la precisión en la etapa de diseño de las variables de infiltración, rendimiento de los equipos y las consignas y horarios de activación de la calefacción acorde a las realidades locales, sólo de esta manera podremos crear simulaciones más sólidas, con consumos energéticos más representativos, lo que significaría un aporte a las políticas energéticas disminuyendo las brechas

Capítulo 5. Discusión

sociales. Por último, es importante señalar que las futuras investigaciones, puedan discutir sobre la necesidad de desarrollar distintos perfiles de ocupación acordes a las realidades de consumo, usar consignas con métodos de confort adaptativo y la relevancia de incluir datos fidedignos en los estándares sobre los Rendimientos de los equipos, de lo cual hay muy poca información, además de evaluar las Infiltraciones de manera más completa ya que dependen de muchos factores ambientales, contexto urbano y cercano, siendo muchas veces sobreestimada.

Capítulo 6. Conclusiones

Capítulo 6. Conclusiones

Se ha conseguido ajustar el consumo energético de calefacción sobre el Caso Base estudiado, calibrando las variables asociadas a los Límites de Activación y Horarios de Uso por sobre el 60% del consumo entre ambos factores. Esto permitió acortar la Brecha de Desempeño Energético entre caso estudiado bajo los parámetros objetivos propuestos en los Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas (Simulado) y el consumo energético levantando en el trabajo de campo de los hogares vulnerables (Real). Sin embargo, hubo otros parámetros que impactaron de igual manera al consumo y que no se consideraron en la hipótesis.

En primer lugar, gracias a la revisión del estado del arte y el análisis de los estándares normativos locales fue posible identificar las variables que impactaron sobre el consumo energético de las viviendas, pudiendo diseñar y aplicar una encuesta a las familias de la comuna de Mulchén, orientada a la obtención de datos relevantes para el cálculo del impacto de esas variables. Con estos valores se pudieron clasificar los datos en forma ordenada y simple, necesario para calibrar las simulaciones. Complementado incluso, la información energética del modelo, agregando una variable que no se considera el ECSV, como es la Temperatura del Terreno, cuyo impacto generó una diferencia sobre el 10% del consumo energético del Caso Base. En efecto, se logró calibrar una simulación acorde a la realidad vivida por las familias del área de estudio a través del Caso Construido, necesario para sentar la base del análisis comparativo de la brecha de desempeño.

En segundo lugar, al estudiar el impacto que tuvieron las variables asociadas al desempeño energético sobre un Estándar propuesto por las políticas públicas, permitió dar conocer la particularidad que poseen los hogares vulnerables del Centro Sur de Chile y de qué manera se está sobreestimado algunos de sus parámetros. Las novedades se encontraron sobre aquellas variables que impactaron sobre el 20% del consumo como, la infiltración, el rendimiento de los equipos y los límites y horarios de activación de la calefacción, asociando estas últimas dos, al comportamiento de un tipo usuario particular.

Por otro lado, el análisis de sensibilidad realizado, permitió cuantificar la brecha de desempeño energético generada entre la Teoría propuesta del ECSV y la Realidad medida en los hogares vulnerables de la comuna estudio, resultando de acuerdo a lo anterior, en dos propuestas de reducción de la brecha a través de simulaciones basadas en las variables del Caso Construido, ajustando en primera instancia la Infiltración a **8 ac/h at 50Pa**, consiguiendo disminuir la brecha a un

Capítulo 6. Conclusiones

14% y finalmente, un modelo basado en la combinación anterior, modificando el Rendimiento del Equipo de Calefacción a 0,8 resultando en una brecha de desempeño de 5,7%.

Un resultado que merece la pena destacar, es el impacto medido sobre la variable del Límite de la Activación de Calefacción, que si bien, podemos señalar que el actual Estándar está siguiendo un buen camino, al aplicar la evaluación en base al método de confort adaptativo con las consignas detalladas en la Tabla 4-4, el estudio logró demostrar que se pueden mejorar aún más, proponiendo límites de temperatura mucho más detallados y acordes a las realidades levantadas, con valores por día y no mensuales como propone el estándar, disminuyendo sólo con este cambio, más del 20% el consumo energético.

Otro resultado que vale la pena resaltar, son los Horarios de activación de los equipos, que difieren bastante de los criterios de evaluación energética utilizados en el ECSV, que plantean una condición de calefacción permanente en las viviendas, lo que resulta muy difícil de lograr, a diferencia de los perfiles de uso propuestos por la investigación, detallados por mes y cantidad de horas, asociados a lo levantado en las encuestas y la literatura. Este parámetro debe ser revisado por los organismos públicos, puesto que, estas diferencias pueden conducir a una sobreestimación de los ahorros energéticos de las familias.

Sin embargo, no debemos olvidar que los resultados deben ser evaluados con mesura debido a las limitaciones metodológicas que podrían comprometer la validez externa de la investigación. Una de ellas se debe al diseño no aleatorio del estudio, ya que se centró en un grupo objetivo a partir de datos disponibles entregados por el PCBE, otra correspondería al caso de estudio seleccionado para la simulación, que, si bien es representativo a las viviendas catastradas, no es generalizable en sus resultados, ya que necesita una mayor cantidad de casos a investigar. Por último, el ajuste de la variable asociada al Rendimiento del Equipo, puede resultar un dato muy difícil de obtener, debido a la complejidad que significaría medir ese coeficiente en las viviendas.

Por último, se puede concluir que esta investigación ha logrado identificar aquellos parámetros que más impactan sobre el CEC de las viviendas de las familias vulnerables, pudiendo aportar este conocimiento al futuro diseño de políticas públicas de eficiencia energética más acordes a las realidades sociales, a través de simulaciones que puedan considerar los valores propuestos, para recrear consumos energéticos más fidedignos y acortar la brecha de desempeño energético.

Capítulo 6. Conclusiones

Asimismo, a partir de los resultados obtenidos en el estudio, se estima que las futuras líneas de investigación debiesen considerar la metodología aplicada, para analizar las distintas zonas climáticas del país, y evaluar los valores que tiene designado el Estándar para esas áreas, proponiendo nuevos ajustes que permitan disminuir la brecha y calibrar de forma más eficiente las simulaciones.

No obstante, es necesario ir complementando el conocimiento, debido a que son varias las investigaciones han estudiado el impacto del comportamiento del usuario en el desempeño energético de las edificaciones, pero, hay muy pocos estudios que se enfocan en las complejidades que se presentan en la Etapa de Construcción, donde las malas prácticas en obra, la puesta en servicio inadecuada de ciertos procesos constructivos, el desgaste de los materiales y la falta de seguimiento en la operación, podría significar un alto impacto en el consumo energético proyectado, es por esto, que es importante fomentar el estudio en estas áreas y acoger estos vacíos, para contribuir en la reducción de los errores de ejecución y bajo rendimiento relacionado, debido a que es un problema que se debe abordar en conjunto.

Finalmente, es importante destacar que estamos en un escenario climático complejo, donde es urgente realizar cambios, garantizando los correctos procesos de diseño, construcción y operación, donde son varios los actores que impactan sobre desempeño energético de las edificaciones, desde quienes toman las decisiones políticas, fabricantes, diseñadores, constructores, usuarios de la vivienda, entre otros, y que poseen un fin en común de reducir la brecha, lo que se debería traducir en un marco regulatorio más eficiente y justo para las familias.

Referencias bibliográficas

Referencias bibliográficas

- André, P., Georges, B., Lebrun, J., Lemort, V., & Teodorese, I. V. (2008). From model validation to production of reference simulations: How to increase reliability and applicability of building and HVAC simulation models. *Building Services Engineering Research and Technology*, 29(1), 61–72. <https://doi.org/10.1177/0143624407087329>
- Aste, N., Adhikari, R. S., Buzzetti, M., Del Pero, C., Huerto-Cardenas, H. E., Leonforte, F., & Miglioli, A. (2022). nZEB: bridging the gap between design forecast and actual performance data. *Energy and Built Environment*, 3(1), 16–29. <https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2020.10.001>
- Attia, S., Hamdy, M., O'Brien, W., & Carlucci, S. (2013). Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. *Energy and Buildings*, 60, 110–124. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.01.016>
- Azar, E., O'Brien, W., Carlucci, S., Hong, T., Sonta, A., Kim, J., Andargie, M. S., Abuimara, T., El Asmar, M., Jain, R. K., Ouf, M. M., Tahmasebi, F., & Zhou, J. (2020). Simulation-aided occupant-centric building design: A critical review of tools, methods, and applications. In *Energy and Buildings* (Vol. 224). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110292>
- Brøgger, M., Bacher, P., Madsen, H., & Wittchen, K. B. (2018). Estimating the influence of rebound effects on the energy-saving potential in building stocks. *Energy and Buildings*, 181, 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.006>
- Bustamante, W., & Encinas, F. (2012). PARÁMETROS DE DISEÑO Y DESEMPEÑO ENERGÉTICO EN EDIFICIOS DE CLIMA MEDITERRÁNEO. *ARQ (Santiago)*, 82, 116–119. <https://doi.org/10.4067/S0717-69962012000300020>
- Bustamante W, Rozas Y, Cepeda R, Encinas F, & Martínez P. (2009). Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social. *Monografías y Ensayos*, 333.
- CDT. (2015). *Medición del Consumo Nacional de Leña y Otros Combustibles Sólidos Derivados de la Madera*.
- Charlier, D. (2021). Explaining the energy performance gap in buildings with a latent profile analysis. *Energy Policy*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112480>
- Cozza, S., Chambers, J., Brambilla, A., & Patel, M. K. (2021). In search of optimal consumption: A review of causes and solutions to the Energy Performance Gap in residential buildings. In *Energy and Buildings* (Vol. 249). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111253>
- De Wilde, P. (2014). The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. *Automation in Construction*, 41, 40–49. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2014.02.009>
- Dear, & Richard Brager. (1998). *eScholarship UC item 4qq2p9c6*.
- DellaValle, N., Bisello, A., & Balest, J. (2018). In search of behavioural and social levers for effective social housing retrofit programs. *Energy and Buildings*, 172, 517–524. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.002>
- Figueroa, R., Martín, S., Bobadilla, A., Besser, D., Días, M., Arriagada, R., & Espinoza, R. (2013). *Air infiltration in Chilean housing: A baseline determination*.
- Geraldi, M. S., & Ghisi, E. (2020). Building-level and stock-level in contrast: A literature review of

Referencias bibliográficas

- the energy performance of buildings during the operational stage. In *Energy and Buildings* (Vol. 211). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109810>
- Herrando, M., Cambra, D., Navarro, M., de la Cruz, L., Millán, G., & Zabalza, I. (2016). Energy Performance Certification of Faculty Buildings in Spain: The gap between estimated and real energy consumption. *Energy Conversion and Management*, 125, 141–153. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.037>
- Hu, S., Yan, D., Azar, E., & Guo, F. (2020). A systematic review of occupant behavior in building energy policy. *Building and Environment*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106807>
- Jain, N., Burman, E., Stamp, S., Mumovic, D., & Davies, M. (2020). Cross-sectoral assessment of the performance gap using calibrated building energy performance simulation. *Energy and Buildings*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110271>
- Kampelis, N., Gobakis, K., Vagias, V., Kolokotsa, D., Standardi, L., Isidori, D., Cristalli, C., Montagnino, F. M., Paredes, F., Muratore, P., Venezia, L., Dracou, K., Montonen, A., Pyrgou, A., Karlessi, T., & Santamouris, M. (2017). Evaluation of the performance gap in industrial, residential & tertiary near-Zero energy buildings. *Energy and Buildings*, 148, 58–73. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.03.057>
- Kelly, M. T. (2014). *Manual de hermeticidad al aire de edificaciones*. Universidad del Bío-Bío.
- Kragh, J., Rose, J., Knudsen, H. N., & Jensen, O. M. (2017). Possible explanations for the gap between calculated and measured energy consumption of new houses. *Energy Procedia*, 132, 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.638>
- Mahdavi, A., Berger, C., Amin, H., Ampatzi, E., Andersen, R. K., Azar, E., Barthelmes, V. M., Favero, M., Hahn, J., Khovalyg, D., Knudsen, H. N., Navarro, A. L., Roetzel, A., Sangogboye, F. C., Schweiker, M., Taheri, M., Teli, D., Touchie, M., & Verbruggen, S. (2021). The role of occupants in buildings' energy performance gap: Myth or reality? In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su13063146>
- Martínez, P. W., & Kelly, M. T. (2015). Integración de criterios de desempeños en el mejoramiento energético-ambiental de viviendas sociales existentes en Chile. *Ambiente Construido*, 15(2), 47–63. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212015000200013>
- Menezes, A. C., Cripps, A., Bouchlaghem, D., & Buswell, R. (2012). Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap. *Applied Energy*, 97, 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.075>
- Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (2022). *Informe final panel de expertos para mejoras al instrumento de focalización del registro social de hogares*.
- Ministerio de Energía. (2018). *Calculadora de Biomasa - Autogeneración*. <https://autoconsumo.minenergia.cl/?p=2011>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo - Minvu. (2018). *ESTÁNDARES DE CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE PARA VIVIENDAS DE CHILE, TOMO II ENERGÍA*.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2023). *Reporte de Leña Región de la Araucanía – MMA*. <https://mma.gob.cl/araucania/reportes-de-lena-region-de-la-araucania/>
- Molina, P. (2021). *Normativa de aislación térmica y calidad de vida | Preservar*. <https://www.preservar.cl/normativa-de-aislacion-termica-gran-aliada-para-mejorar-la->

Referencias bibliográficas

calidad-de-vida-de-las-personas/

- Muñoz Fierro, J., Pérez Fargallo, A., Muñoz Fierro Ariel Bobadilla-Moreno, J., & Tejedor, B. (2022). *Diseño y operación sostenibles Desarrollado por Editorial Manager® y ProduXion Manager® de Aries Systems Corporation.*
- National Measurement Network. (2012). *The Building Performance Gap-closing it through better measurement Event report.* www.npl.co.uk/measurement-network
- Pereira-Ruchansky, L., & Pérez-Fargallo, A. (2020). Integrated analysis of energy saving and thermal comfort of retrofits in social housing under climate change influence in Uruguay. *Sustainability (Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/su12114636>
- Pérez-Fargallo, A., Pulido-Arcas, J. A., Rubio-Bellido, C., Trebilcock, M., Piderit, B., & Attia, S. (2018). Development of a new adaptive comfort model for low income housing in the central-south of Chile. *Energy and Buildings*, 178, 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.030>
- Pérez-Fargallo, Alexis, Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., & Trebilcock, M. (2020). Energy poverty risk mapping methodology considering the user's thermal adaptability: The case of Chile. *Energy for Sustainable Development*, 58, 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.07.009>
- Pérez-Fargallo, Alexis, Rubio-Bellido, C., Pulido-Arcas, J. A., Gallego-Maya, I., & Guevara-García, F. J. (2018). Influence of adaptive comfort models on energy improvement for housing in cold areas. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/su10030859>
- Pérez-Fargallo, Alexis, Rubio-Bellido, C., Pulido-Arcas, J. A., & Trebilcock, M. (2017). Development policy in social housing allocation: Fuel poverty potential risk index. *Indoor and Built Environment*, 26(7), 980–998. <https://doi.org/10.1177/1420326X17713071>
- Porras-Salazar, J. A., Contreras-Espinoza, S., Cartes, I., Piggot-Navarrete, J., & Pérez-Fargallo, A. (2020). Energy poverty analyzed considering the adaptive comfort of people living in social housing in the central-south of Chile. *Energy and Buildings*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110081>
- Reyes, R., Schueftan, A., Ruiz, C., & González, A. D. (2019). Controlling air pollution in a context of high energy poverty levels in southern Chile: Clean air but colder houses? *Energy Policy*, 124, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.022>
- Sonderegger, R. C. (1977). *Movers and Stayers: The Resident's Contribution to Variation across Houses in Energy Consumption for Space Heating** (Vol. 78).
- Sunikka-Blank, M., & Galvin, R. (2012). Introducing the prebound effect: The gap between performance and actual energy consumption. *Building Research and Information*, 40(3), 260–273. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.690952>
- van den Brom, P., Meijer, A., & Visscher, H. (2018). Performance gaps in energy consumption: household groups and building characteristics. *Building Research and Information*, 46(1), 54–70. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1312897>
- Yan, D., O'Brien, W., Hong, T., Feng, X., Burak Gunay, H., Tahmasebi, F., & Mahdavi, A. (2015). Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges. *Energy and Buildings*, 107, 264–278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.032>
- Zavrl, M. Š., & Stegnar, G. (2017). Comparison of Simulated and Monitored Energy Performance Indicators on NZEB Case Study Eco Silver House. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 52–59.

Referencias bibliográficas

<https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2017.03.074>

Zhang, Y., Bai, X., Mills, F. P., & Pezzey, J. C. V. (2018). Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: A review. In *Energy and Buildings* (Vol. 172, pp. 279–294). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.017>

Anexo A

Anexo A

Listado de preguntas realizadas en la Encuesta.

Anexo B

Listado de respuestas de la Encuesta, comuna de Mulchén.