

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
SANTIAGO - CHILE



**EVALUACIÓN ECONÓMICA, ENERGÉTICA Y AMBIENTAL DE SISTEMAS DE
CALEFACCIÓN EN LA VIVIENDA SOCIAL DS-10 EN CHILOÉ.**

CRISTÓBAL ISAÍAS BRAHM GUARDA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO/A CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : SR. RODRIGO DEMARCO B.
PROFESOR CORREFERENTE : SR. FABIÁN BUSTOS O.

AGOSTO 2024

AGRADECIMIENTOS

Por el apoyo incondicional en este camino, me gustaría agradecer a mi padre y a mi madre, Carlos Brahm y Clara Luz Guarda, por siempre estar presentes, atentos, entregando amor incondicional, apoyo constante y todas las formas de expresión de amor a lo largo de este viaje académico. Definitivamente, nada de esto sería posible de no ser por ustedes. También agradecer a todos mis seres queridos, familiares y amigos que de una u otra forma aportaron su granito de arena, ya sea con una comida, una invitación a compartir, una risa, un buen momento y todo el apoyo moral que me han brindado en cada escalón. Agradezco eternamente su compañía en mi vida.

Expreso mi más sincero agradecimiento al profesor Fabián Bustos, cuya guía experta y encarrilamiento de una idea vaga fue, sin duda alguna, lo más relevante para lograr desarrollar esta tesis y, hoy en día, como futuro profesional, tener claro el área en que me gustaría desarrollarme y aportar mi granito de arena al mundo. Agradecer al profesor Rodrigo Demarco, quien hizo posible el desarrollo de esta tesis.

Agradezco al arquitecto Marco Marques del SECPLAN de la ciudad de Chonchi por facilitar los planos de la vivienda DS-10 simulada, lo cual fue fundamental para la realización de este estudio. Mi reconocimiento especial para el profesor Guillermo Barrios, quien de forma muy generosa y desinteresada me entregó una guía para el uso del software, lo cual fue realmente importante para el desarrollo de la investigación. A todos aquellos profesores que han sido parte de mi desarrollo como estudiante, que de una u otra forma me formaron y guiaron todos estos años.

Por último, a todas las personas que de una forma u otra contribuyeron a la realización de este proyecto, les expreso mi más sincero agradecimiento. Su apoyo y colaboración fueron fundamentales para alcanzar este importante logro en mi vida académica.

RESUMEN EJECUTIVO

Este estudio evalúa diversos sistemas de calefacción para una vivienda tipo DS-10 en Chiloé, considerando tanto aspectos económicos como ambientales. La investigación se llevó a cabo utilizando dos escenarios de renovación de aire por hora: 4 y 24 renovaciones. Los sistemas evaluados fueron: estufa a leña, aire acondicionado, estufa a parafina, estufa a pellet, calefactor oleoeléctrico y estufa a gas licuado.

Metodología

Se realizó una evaluación económica que incluyó la inversión inicial, vida útil, tasa de descuento, valor de salvamento y costos anuales de operación. Además, se evaluaron las emisiones de partículas finas (MP 2,5), dióxido de carbono equivalente ($tonCO_2$) y la contaminación intradomiciliaria asociada a cada sistema.

Para la evaluación general, se normalizaron los valores de MP 2,5, $tonCO_2$, contaminación intradomiciliaria y CAUE (Costo Anual Uniforme Equivalente). A cada ítem se le asignó un peso, destacando la importancia económica (50 %) por sobre los aspectos ambientales (16,67 % cada uno).

Resultados

Evaluación Económica:

- Para 4 renovaciones de aire por hora, los sistemas más económicos fueron el calefactor oleoeléctrico y la estufa a pellet.
- Para 24 renovaciones de aire por hora, la estufa a pellet mantuvo un buen rendimiento económico y la estufa a leña destacó como el sistema de calefacción más económico. Sin embargo, el costo de operación de los sistemas eléctricos aumentó considerablemente en comparación al caso con 4 renovaciones de aire por hora.

Evaluación de Emisiones:

- El aire acondicionado y el calefactor oleoeléctrico presentaron las menores emisiones de MP 2,5 y contaminación intradomiciliaria en ambos escenarios, junto a unos bajos indicadores de $tonCO_2$.
- La estufa a pellet presenta bajas emisiones de $tonCO_2$ y contaminación intradomiciliaria moderada.

Evaluación General:

- En el escenario de 4 renovaciones de aire por hora, el calefactor oleoeléctrico fue el sistema con el mejor rendimiento global, seguido por la estufa a pellet.
- En el escenario de 24 renovaciones de aire por hora, la estufa a pellet se destacó como la opción con mejor indicador general y en segundo lugar la estufa a leña.

Conclusiones

Este estudio destaca la importancia de considerar tanto los aspectos económicos como ambientales al seleccionar un sistema de calefacción para la vivienda social DS-10 ubicada en Chiloé. La estufa a pellet emerge como la opción más equilibrada en todos los ámbitos evaluados, combinando eficiencia económica con un impacto ambiental moderado y una satisfacción de la demanda óptima en un espectro amplio de requerimientos. Se recomienda que las políticas y decisiones futuras promuevan el uso de sistemas de calefacción sostenibles que ofrezcan un buen balance entre costo y desempeño ambiental.

Palabras Clave. Evaluación Económica, Evaluación Energética, Evaluación Ambiental, Sistemas de Calefacción, Vivienda Social DS-10, Chiloé, OpenStudio, EnergyPlus.

ABSTRACT

This study evaluates various heating systems for a DS-10 type home in Chiloé, considering both economic and environmental aspects. The research was carried out using two air renewal scenarios per hour: 4 and 24 renewals. The systems evaluated were: wood stove, air conditioning, paraffin stove, pellet stove, oleoelectric heater and liquefied gas stove.

methodology

An economic evaluation was carried out that included the initial investment, useful life, discount rate, salvage value and annual operating costs. In addition, the emissions of fine particles (MP 2.5), carbon dioxide equivalent ($tonCO_2$) and indoor pollution associated with each system were evaluated.

For the general evaluation, the values of PM 2.5, $tonCO_2$, indoor pollution and CAUE (Equivalent Uniform Annual Cost) were normalized. Each item was assigned a weight, highlighting the economic importance (50 %) over the environmental aspects (16.67 % each)

Results

Economic evaluation:

- For 4 air changes per hour, the most economical systems were the oleoelectric heater and the pellet stove.
- For 24 air changes per hour, the pellet stove maintained good economic performance and the wood stove stood out as the most economical. However, the operating cost of the electrical systems increased considerably compared to the case with 4 air changes per hour.

Emissions Assessment:

- The air conditioning and the oleoelectric heater presented the lowest emissions of PM 2.5 and indoor pollution in both scenarios, along with low indicators of $tonCO_2$.
- The pellet stove showed moderate emissions of PM 2.5 and low emissions of $tonCO_2$, being a more balanced option in environmental terms.

General evaluation:

- In the scenario of 4 renewals per hour, the oleoelectric heater was the system with the best overall performance, closely followed by the pellet stove.
- In the scenario of 24 renewals per hour, the pellet stove stood out as the most efficient option.

Conclusions

This study highlights the importance of considering both economic and environmental aspects when selecting a heating system for the DS-10 social housing located in Chiloé. The pellet stove emerges as the most balanced option, combining economic efficiency with a moderate environmental impact and optimal demand satisfaction across a wide spectrum of requirements. It is recommended that future policies and decisions promote the use of sustainable heating systems that offer a good balance between cost and environmental performance.

Keywords. Economic Evaluation, Energy Evaluation, Environmental Evaluation, Heating Systems, Social Housing DS-10, Chiloé, OpenStudio, EnergyPlus.

Índice de Contenidos

1. Problema de Investigación	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. Alcance	3
1.2.1. Vivienda Social DS-10	6
1.2.2. Modelado Energético con OpenStudio y EnergyPlus	6
1.2.3. Sistemas de Calefacción	6
2. Marco Teórico	8
2.1. Energía y Transferencia de Calor	8
2.1.1. Tipos de energía	8
2.1.2. Transferencia de calor	9
2.2. Vivienda, Eficiencia y Características	9
2.2.1. Balance de energía en viviendas	9
2.2.2. Demanda de energía	10
2.2.3. Consumo de energía	13
2.2.4. Eficiencia Energética	14
2.2.5. Desempeño energético	14
2.2.6. Calificación energética	15
2.3. Confort y Envolvente Térmica	16
2.3.1. Transferencia de calor por la envolvente debido a diferencia de temperatura	16
2.3.2. Confort Térmico	17
2.3.2.1. Método citado por Andris Auliciems y Steven V. Szokolay	18
2.3.2.2. Método simplificado de confort adaptativo	19
2.3.2.3. Método propuesto por Dear y Brager, citado en ASHRAE	19
2.3.2.4. Comparación del comportamiento de cada método	19
2.4. Caracterización del Consumo de Energía en el Sector Residencial y Viviendas Sociales	20
2.4.1. Materiales de Aislación	24
2.4.2. Renovaciones de aire	25
2.4.3. Vivienda Social DS-10	26
2.4.3.1. Programa Habitabilidad Rural (DS-10)	26
2.4.3.2. Diseño Vivienda Social DS-10	26
2.5. Reglamentación y Normativa Térmica de Viviendas	29
2.5.1. O.G.U.C. Artículo 4.1.10, año 2000 - 2007	30
2.5.2. O.G.U.C. Artículo 4.1.10, año 2007 - 2023	31
2.5.3. O.G.U.C. Artículo 4.1.10, año 2024	31
2.5.4. NCh 853, año 2007	33
2.5.5. Zonas Térmicas	33
2.5.5.1. Actual Zonificación	33
2.5.5.2. Nueva Zonificación	34

2.6. Material Particulado 2,5	35
2.7. Herramientas Computacionales	35
2.7.1. ¿Qué es una herramienta computacional?	35
2.7.2. EnergyPlus y OpenStudio	35
2.7.2.1. ¿Qué es EnergyPlus?	35
2.7.2.2. ¿Qué es OpenStudio?	36
2.8. Metodología	37
2.8.1. Recopilación de Información del Diseño de Vivienda	38
2.8.2. Catastro de Construcción de Viviendas	38
2.8.3. Cálculo de Resistencias Térmicas y Evaluación del Cumplimiento de la Normativa	38
2.8.4. Modelado en OpenStudio con el Motor de EnergyPlus	40
2.8.4.1. Temperatura de Confort	42
2.8.4.2. Cantidad de Infiltraciones	43
2.8.5. Sistemas de Calefacción Evaluados	44
2.8.6. Cálculo de Costos Operación e Índice de Cobertura de Demanda	44
2.8.7. Cálculo de Emisiones de MP 2,5	46
2.8.8. Cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	46
2.8.9. Emisiones Intradomiciliarias	47
2.8.10. Evaluación Económica de los Sistemas de Calefacción	47
2.8.11. Indicador General	47
2.9. Resultados	49
2.9.1. Análisis de Cumplimiento de Normativas	49
2.9.2. Análisis de Mejoras de Aislación Térmica	49
2.9.3. Análisis Infiltraciones y Demanda Energética	50
2.9.4. Análisis de Índice de Cobertura de Demanda (ICD)	52
2.9.4.1. Caso 4 Renovaciones de Aire por Hora	53
2.9.4.2. Caso de 24 Renovaciones de Aire por Hora	53
2.9.5. Análisis Económico de los Sistemas de Calefacción	54
2.9.6. Análisis de Emisiones	56
2.9.7. Análisis General	57
3. CONCLUSIONES	60
3.0.1. Trabajos futuros	61
A. ANEXOS	65
A.1. Memoria de cálculo	65
A.1.1. Resistencias térmicas del caso base	65
A.1.2. Temperatura de confort	67
A.1.3. Recambios de aire	68
A.1.4. Costos de Operación y ICD	69
A.1.5. Cálculo económicos	71

Índice de Tablas

2.1. Temperaturas máximas y mínimas en las zonas térmicas	20
2.2. Tabla de caracterización de materiales. (Fuente: Manual de acondicionamiento térmico)	25
2.3. Tabla renovaciones de aire por hora. (Fuente: Manual de diseño para soluciones en edificaciones.)	25
2.4. Exigencias para aislación térmica de viviendas, establecidas por la O.G.U.C. entre los años 2000 a 2007. (Fuente: Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), año 2000.)	30
2.5. Exigencias para aislación térmica de viviendas, establecidas por la O.G.U.C. entre los años 2007 a la actualidad. (Fuente: Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), año 2007.)	31
2.6. Exigencias para el vidriado en viviendas, establecidas por la O.G.U.C. entre los años 2007 a la actualidad. (Fuente: Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), año 2007.)	31
2.7. Exigencias establecidas por la OGUC del año 2024. (Fuente: O.G.U.C. 2024)	31
2.8. Exigencias establecidas por la OGUC del año 2024. (Fuente: O.G.U.C. 2024.)	32
2.9. Exigencias en cuanto a infiltraciones establecidas por la OGUC del año 2024. (Fuente: O.G.U.C. 2024.)	32
2.10. Cantidad de viviendas construidas en Castro, agrupadas según el intervalo de fechas donde se crearon las normativas de construcción (año 2000) y su actualización (año 2007). (Fuente: Creación propia.)	38
2.11. Soluciones constructivas y variaciones de renovaciones de aire por hora evaluadas en las simulaciones. (Fuente: Creación propia.)	40
2.12. Temperatura de confort calculada mediante el método simplificado de confort adaptativo. (Fuente: Creación propia.)	43
2.13. Volumen de las zonas de la vivienda DS-10 y volumen requerido de recambio. (Fuente: Creación propia.) . . .	43
2.14. Cantidad óptima de renovaciones de aire para la vivienda DS-10. (Fuente: Creación propia.)	43
2.15. Sistemas de calefacción evaluados y características principales. (Fuente: Excel de Ministerio de Energía.)	44
2.16. Factores de emisión de MP 2,5 según combustible. (Fuente: (Mardones, 2021).)	46
2.17. Factores de emisión de gases efecto invernadero según combustible y valor del GWP. (Fuente: (GHG Protocol, 2024), (Ozgen y Caserini, 2018), (Gómez et al., 2006), (U.S. Environmental Protection Agency, 2018)., (Seljeskog, Goile y Skreiberg, 2017) e (IPCC, 2021).)	47
2.18. Valorización de indicadores cualitativos de contaminación intradomiciliaria. (Fuente: Creación propia.)	48
2.19. Valores . (Fuente: Creación propia.)	48
2.20. Cumplimiento de normativas de resistencias térmicas de muros, techumbre y pisos ventilados. (Fuente: Creación propia.)	49
2.21. Variación de la demanda por mejora de aislación térmica aplicada. (Fuente: Creación propia.)	49
2.22. Variación de la Demanda Energética según los Modelos con Cierta Cantidad de Renovaciones de Aire por Hora. (Fuente: Creación propia.)	52
2.23. Variación de la Demanda Energética entre los promedios de los modelados con una determinada cantidad de renovaciones de aire por hora. (Fuente: Creación propia.)	52
2.24. Ciclo económico del los sistemas de calefacción para el caso base. (Fuente: Creación propia.)	55
2.25. Ciclo económico del los sistemas de calefacción para el caso de 24 renovaciones de aire por hora. (Fuente: Creación propia.)	56
2.26. Resultados de emisiones generadas por cada sistema de calefacción en 8 horas de uso, en el caso de 4 renovaciones de aire por hora (Fuente: Creación propia.)	57
2.27. Resultados de emisiones generadas por cada sistema de calefacción en 8 horas de uso, en el caso de 24 renovaciones de aire por hora. (Fuente: Creación propia.)	57

2.28. Valores cuantitativos para la contaminación intradomiciliaria. (Fuente: Creación propia.)	58
2.29. Pesos porcentuales para los ítem evaluados. (Fuente: Creación propia.)	58
2.30. Valores normalizados para 4 renovaciones e indicador general. (Fuente: Creación propia.)	59
2.31. Valores normalizados para 24 renovaciones e indicador general. (Fuente: Creación propia.)	59



Índice de Figuras

1.1. Isla de Chiloé. (Fuente: Imagen extraída de Google Earth Pro)	3
1.2. Comuna de Castro. (Fuente: Imagen extraída de Google Maps)	4
1.3. Comportamiento de la temperatura anual y límites de temperatura de confort para invierno y verano en Castro. (Fuente: Imagen extraída de Climate Consultant 6.0)	4
1.4. Comportamiento de la Radiación en Castro. (Fuente: Imagen extraída de Climate Consultant 6.0)	5
1.5. Comportamiento de la nubosidad en Castro. (Fuente: Imagen extraída de Climate Consultant 6.0)	5
2.1. Ganancias y pérdidas de energía en verano (A) e invierno (B). (Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico) . . .	9
2.2. Gráfico de comportamiento de la demanda energética de la edificación vs. la superficie expuesta de esta misma. (Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico)	10
2.3. Casos considerados en las simulaciones para la situación actual. (Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico) . .	11
2.4. Demanda de energía por zona térmica para el Caso Base sin aislación. (Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico.)	12
2.5. Demanda de energía por zona térmica para viviendas con aislación de techumbre según normativa de la O.G.U.C. año 2000. (Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico.)	12
2.6. Demanda de energía por zona térmica para viviendas acondicionadas según la normativa O.G.U.C. año 2007. (Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico.)	12
2.7. Tabla de consumo de energía para distintos tipos de calefacción. (Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico.) .	13
2.8. Procesos de transferencia de calor en una vivienda. (Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico)	14
2.9. Pasos para realizar la postulación. (Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico)	15
2.10. Etiqueta de calificación energética y etiqueta de pre-calificación energética. (Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico)	16
2.11. Conducción en una vivienda en verano (izquierda) e invierno (derecha). (Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico)	17
2.12. Temperatura de confort neutral T_n . (Fuente: Manual de Procedimientos Calificación Energética de Viviendas en Chile.)	19
2.13. Gráfico que muestra la distribución de combustibles usados para generar la energía residencial. (Fuente: Informe final de usos de la energía de los hogares Chile 2018.)	21
2.14. Gráfico que muestra el uso de la energía residencial. (Fuente: Informe final de usos de la energía de los hogares Chile 2018.)	22
2.15. Gráfico de la energía residencial utilizada, clasificada según su uso final y la zona térmica. (Fuente: Informe final de usos de la energía de los hogares Chile 2018.)	23
2.16. Se presentan los porcentajes de pérdida de energía de la vivienda según sección constructiva. (Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico)	24
2.17. Elevación frontal de vivienda social DS-10. (Fuente: Diseño en AutoCAD proveniente de SECPLAN de la ciudad de Chonchi, por el arquitecto Marco Marquez)	26
2.18. Elevación lateral derecha de vivienda social DS-10. (Fuente: Diseño en AutoCAD proveniente de SECPLAN de la ciudad de Chonchi, por el arquitecto Marco Marquez)	27
2.19. Elevación lateral izquierda de vivienda social DS-10. (Fuente: Diseño en AutoCAD proveniente de SECPLAN de la ciudad de Chonchi, por el arquitecto Marco Marquez)	27
2.20. Elevación posterior de vivienda social DS-10. (Fuente: Diseño en AutoCAD proveniente de SECPLAN de la ciudad de Chonchi, por el arquitecto Marco Marquez)	28
2.21. Vista de planta de vivienda social DS-10. (Fuente: Diseño de en AutoCAD proveniente de SECPLAN de la ciudad de Chonchi, por el arquitecto Marco Marquez)	28

2.23. Ventanas de vivienda social DS-10. (Fuente: Diseño de en AutoCAD proveniente de SECPLAN de la ciudad de Chonchi, por el arquitecto Marco Marquez)	29
2.22. Puertas exteriores de vivienda social DS-10. (Fuente: Diseño de en AutoCAD proveniente de SECPLAN de la ciudad de Chonchi, por el arquitecto Marco Marquez)	29
2.24. Distribución de viviendas en Chile según año de construcción. (Fuente: Manual de acondicionamiento térmico.)	30
2.25. Zonas térmicas bajo las 7 tipologías, para la X región. (Fuente: Manual de Aplicación Reglamentación Térmica.)	33
2.26. Leyenda para la lectura e interpretación del mapa de zonificación. (Fuente: Manual de Aplicación Reglamentación Térmica.)	34
2.27. Mapa de zonificación térmica para la Macrozona Sur, con categorías de la "A" a la "I". (Fuente: Resolución Exenta 1636, año 2019)	34
2.28. Logo de EnergyPlus. (Fuente: Página oficial de EnergyPlus)	36
2.29. Logo de EnergyPlus. (Fuente: Página oficial de OpenStudio)	36
2.30. Diagrama de flujo del trabajo realizado. (Fuente: Creación propia)	37
2.31. Resistencias térmicas de superficie. (Fuente: NCh853)	39
2.32. Diagrama de flujo del trabajo en OpenStudio. (Fuente: Creación propia)	41
2.33. Renovaciones de aire por lugar. (Fuente: Manual de Diseño para Soluciones en Edificaciones)	42
2.34. Comportamiento de la temperatura de bulbo seco y humedad relativa en el mes de junio. (Fuente: Climate consultant 6.0)	44
2.35. Leyenda gráfico de la temperatura de bulbo seco y humedad relativa en el mes de junio. (Fuente: Climate Consultant 6.0)	45
2.36. Gráfico de demanda energética según la cantidad de infiltraciones de aire. (Fuente: Creación propia.)	51
2.37. Índice de Cobertura de la Demanda por sistema de calefacción con 8 hrs. de uso. (Fuente: Creación propia.)	53
2.38. Índice de Cobertura de la Demanda por sistema de calefacción con 8 hrs. de uso. (Fuente: Creación propia.)	54
A.1. Se presentan las características para evaluar la resistencia térmica del muro. (Fuente: Creación propia.)	65
A.2. Se presentan las características de los materiales del muro. (Fuente: Creación propia.)	65
A.3. Se presentan los resultados de las resistencias térmicas del muro. (Fuente: Creación propia.)	65
A.4. Se presentan las características para evaluar la resistencia térmica de la techumbre. (Fuente: Creación propia.)	65
A.5. Se presentan las características de los materiales de la sección 1 de la techumbre. (Fuente: Creación propia.)	66
A.6. Se presentan las características de los materiales de la sección 2 de la techumbre (Fuente: Creación propia.)	66
A.7. Se presentan los resultados de la resistencia térmica de la sección 1 de la techumbre. (Fuente: Creación propia.)	66
A.8. Se presentan los resultados de la sección 2 de la techumbre. (Fuente: Creación propia.)	66
A.9. Se presentan las características para evaluar la resistencia térmica de los pisos ventilados. (Fuente: Creación propia.)	66
A.10. Se presentan las características de los materiales del piso ventilado. (Fuente: Creación propia.)	66
A.11. Se presentan los resultados de resistencia térmica de los pisos ventilados. (Fuente: Creación propia.)	67
A.12. Se presentan los métodos de cálculo de temperatura de confort evaluados. (Fuente: Creación propia.)	67
A.13. Constantes utilizadas para cada método de cálculo de temperatura de confort. (Fuente: Creación propia.)	67
A.14. Se presentan los espacios considerados para el dimensionamiento del volumen de recambio. (Fuente: Creación propia.)	68
A.15. Se presentan la cantidad de renovaciones de aire por hora requeridos. (Fuente: Creación propia.)	68
A.16. Tabla que presenta el índice de cobertura de la demanda y los costos de operación de los equipos evaluados. (Fuente: Planilla de cálculo Ministerio de Energía.)	69
A.17. Características de los sistemas de calefacción. (Fuente: Planilla de cálculo Ministerio de Energía.)	70
A.18. Imagen referencial del cálculo del CAUE. (Fuente: Creación propia)	71
A.19. Resultados evaluación económica. (Fuente: Creación propia)	72

1 | Problema de Investigación



Una aplicación óptima de aislamiento térmico es crucial para mantener la temperatura interna de una vivienda, este factor es relevante en cada hogar, ya que se traduce en un menor consumo de energía y por ende en un ahorro en costos en calefacción o enfriamiento según corresponda el contexto. Sin embargo, en muchos lugares del mundo existen viviendas que carecen de una adecuada aislación térmica, esto ya sea debido al espacio temporal y contexto en el que fue construida con las respectivas normativas, materiales a disposición y factores socioeconómicos que no permiten el uso y correcta aplicación de materiales ideales para lo que hoy en día se considera una óptima aislación térmica para la zona térmica en la cual se trabaja. Estos factores son aspectos importantes en las construcciones hechas en el archipiélago de Chiloé, el cual se caracteriza por un clima fresco, húmedo y lluvioso durante la mayor parte del año, haciendo esencial la aislación térmica, una construcción realizada de forma prolija y sistemas de calefacción en los hogares. Según indica en su página la empresa de luz Factorenergía (Factorenergía, 2018), el uso de sistemas de aislamiento térmico puede generar ahorros de energía en el rango del 30 % al 70 %, dependiendo de las características del edificio y de las condiciones climáticas.

Algunos aspectos importantes de la problemática identificada son, en primer lugar, la falta de una adecuada aislación térmica que aumenta los costos en calefacción. En segundo lugar, se encuentra el requerimiento de energía en calefacción, el cual tiene efectos adversos en el medio ambiente causado por la combustión de combustibles que emiten material particulado en específico el 2,5 (desde ahora en adelante se nombra como MP2,5) y gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, óxido nitroso y metano que contribuyen al cambio climático. Según indica la página del ministerio del medio ambiente (Ministerio del Medio Ambiente, 2024a), en el 2018 el sector de energía es responsable del 77 % de las emisiones de gases efecto invernadero.

En tercer y último lugar, el humo de las estufas a leña generan efectos directos en la salud de la población, como indica la EPA "La mayor amenaza del humo proviene de las partículas finas, también llamadas material particulado o PM_{2,5}. Estas partículas microscópicas pueden entrar en los ojos o sistema respiratorio, y provocar ardor en los ojos, goteo nasal, y enfermedades, como bronquitis. Las partículas finas pueden empeorar los síntomas del asma y desencadenar ataques de asma. Las partículas finas también pueden desencadenar infartos de miocardio, ritmo cardíaco irregular e insuficiencia cardíaca, en especial en personas que ya están en riesgo por estas enfermedades." (Protección Ambiental de Estados Unidos, 2023).

La justificación de esta investigación sobre el impacto de una aplicación óptima del aislamiento térmico en los costos de la energía utilizada en calefacción de las viviendas en Chiloé, se debe a que esta problemática tiene efectos significativos en la calidad de vida de las personas, tanto en factores socioeconómicos como en la sostenibilidad ambiental de la región. Es por esto que la presente investigación es una potencial ayuda para identificar las disminuciones de demanda energética mediante mejoras de aislación térmica, mejorar la calidad de las construcciones que disminuyan la cantidad de infiltraciones de aire por hora y seleccionar el sistema de calefacción óptimo económica y medio ambientalmente. Con lo anterior se espera poder generar una discusión, abordando la problemática y fomentar políticas públicas orientadas a mejorar la calidad de las viviendas de la zona térmica evaluada.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Evaluar el impacto de la implementación de mejoras de aislamiento térmico e infiltraciones de aire, en la demanda energética, costos y emisiones de los diferentes sistemas de calefacción en la vivienda social DS-10 en Chiloé.

1.1.2. Objetivos específicos

- Recopilar información sobre el diseño y materiales de la vivienda social DS-10.
- Recopilar información sobre las normativas anteriores y actuales de aislación térmica para las viviendas.
- Verificar cumplimiento de normativas térmicas para viviendas.
- Modelar y simular el comportamiento térmico de la vivienda social DS-10 con diferentes escenarios de aislamiento térmico y cantidad de renovaciones de aire por hora, mediante el software OpenStudio y EnergyPlus obteniendo la demanda energética para tener la temperatura de confort.
- Evaluar el impacto de las mejoras en aislación térmica de la vivienda social DS-10.
- Analizar la variación en la demanda energética para la calefacción de la vivienda DS-10 en los escenarios seleccionados para su evaluación.
- Analizar el desempeño de sistemas de calefacción en términos de cobertura de demanda, económicos y de emisiones contaminantes.
- Diseñar un método para la elección de equipos de calefacción según la demanda energética de la vivienda.
- Proponer recomendaciones para mejorar la eficiencia energética y la calidad ambiental interior de las viviendas sociales DS-10 en Chiloé.

1.2. Alcance

Esta tesis se limita a analizar la vivienda social DS-10, realizando variaciones en la aislación térmica y cantidad de infiltraciones de aire por hora. Se sitúa en el contexto climático de la isla de Chiloé (Figura 1.1), específicamente se utiliza un archivo climático que representa a la comuna de Castro, la cual esta demarcada en la Figura 1.2. A continuación se realiza la descripción del archivo climático trabajado. Se indica como locación Castro-Gamboa, LL, CHL, ubicado en la latitud 42.483° Sur y longitud 73.767° Oeste, la zona horaria respecto a Greenwich es de -4, la estación tiene una elevación sobre el nivel del mar de 44 metros.

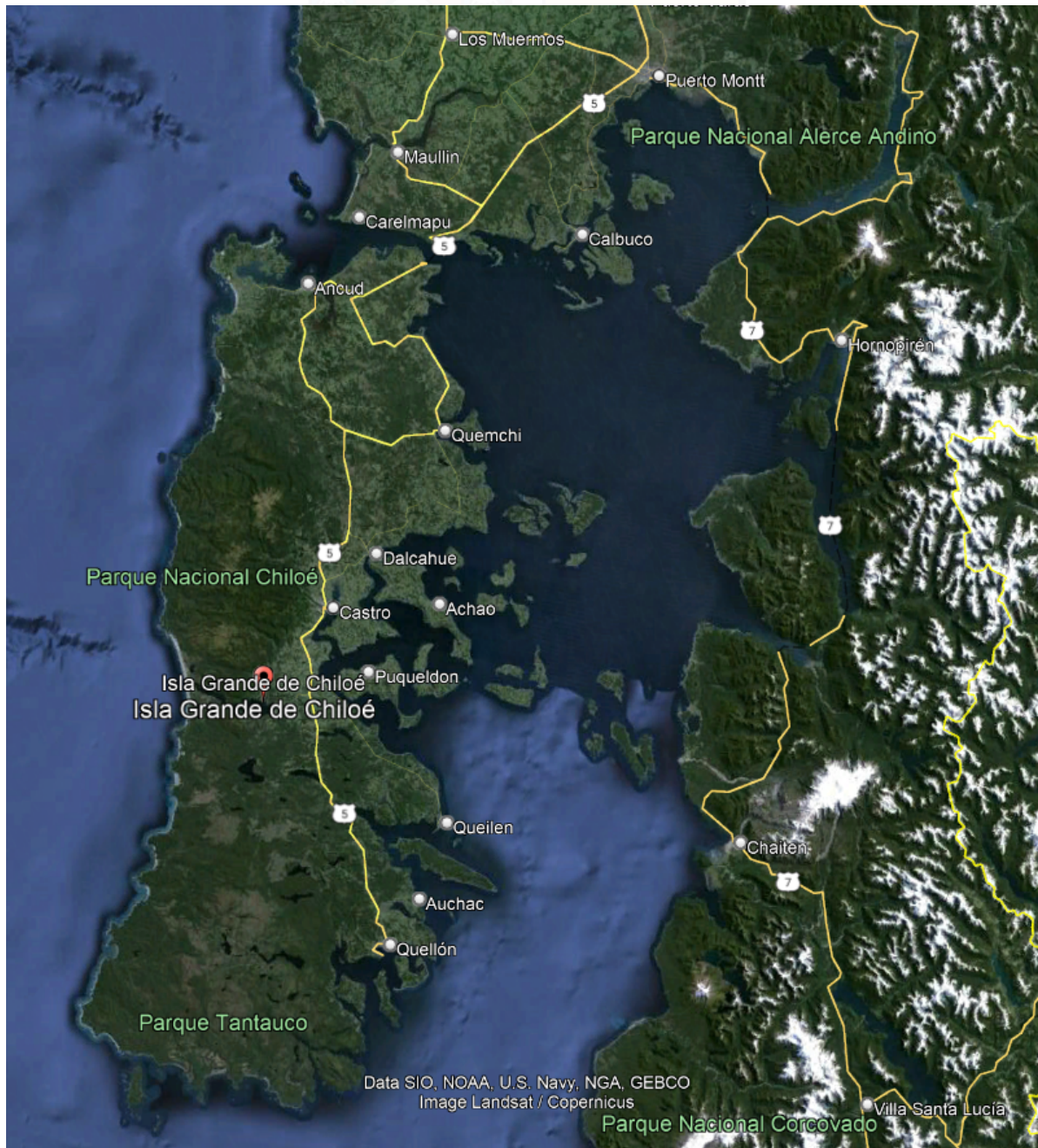


Figura 1.1: Isla de Chiloé.
(Fuente: Imagen extraída de Google Earth Pro)

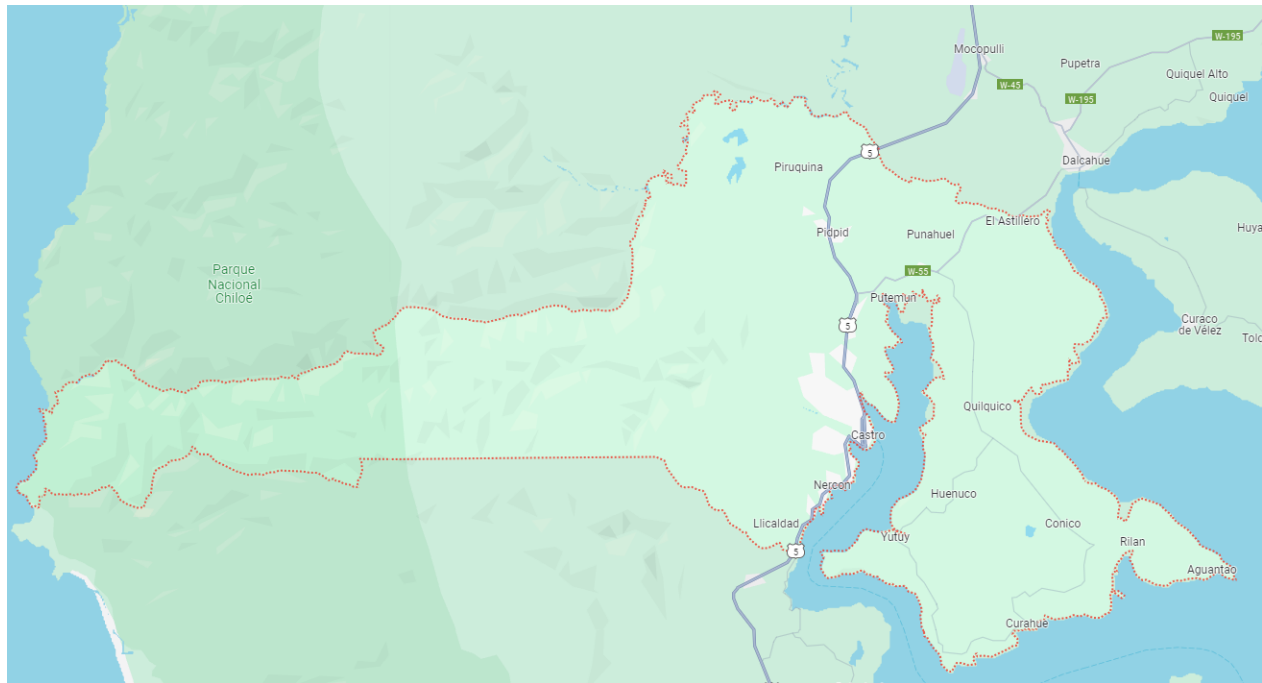


Figura 1.2: Comuna de Castro.
(Fuente: Imagen extraída de Google Maps)

En la Figura 1.3 se observa que el rango del comportamiento de las temperaturas en Castro en los meses entre marzo y noviembre no logra alcanzar a la temperatura de confort de invierno, salvo en los máximos de marzo y un outlier en noviembre. En cuanto a la media de las temperaturas, en ningún mes se logra la zona de confort, por lo que mayoritariamente se presenta una condición de frío.

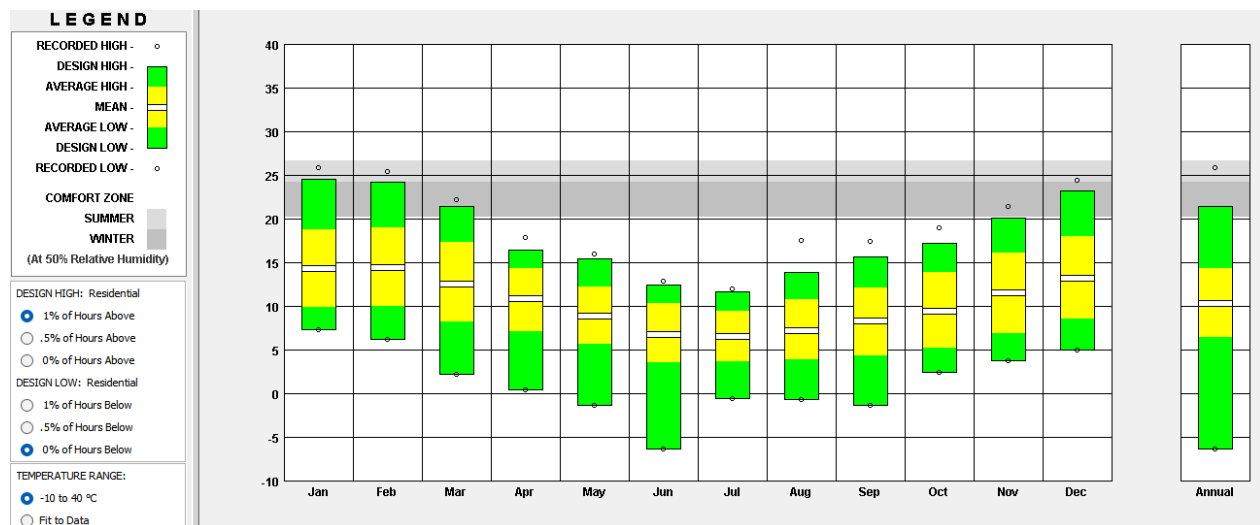


Figura 1.3: Comportamiento de la temperatura anual y límites de temperatura de confort para invierno y verano en Castro.
(Fuente: Imagen extraída de Climate Consultant 6.0)

Se observa en Figura 1.4 que el rango de radiación va en promedio de los $100 \frac{W}{m^2}$ a los $400 \frac{W}{m^2}$, estos valores están dentro de un rango común y beneficioso para los procesos naturales, sin generar un calentamiento excesivo de la superficies o del aire. Estos rangos se dan comúnmente en días nublados o parcialmente nublados, característicos de la zona como se indica en la Figura 1.5.

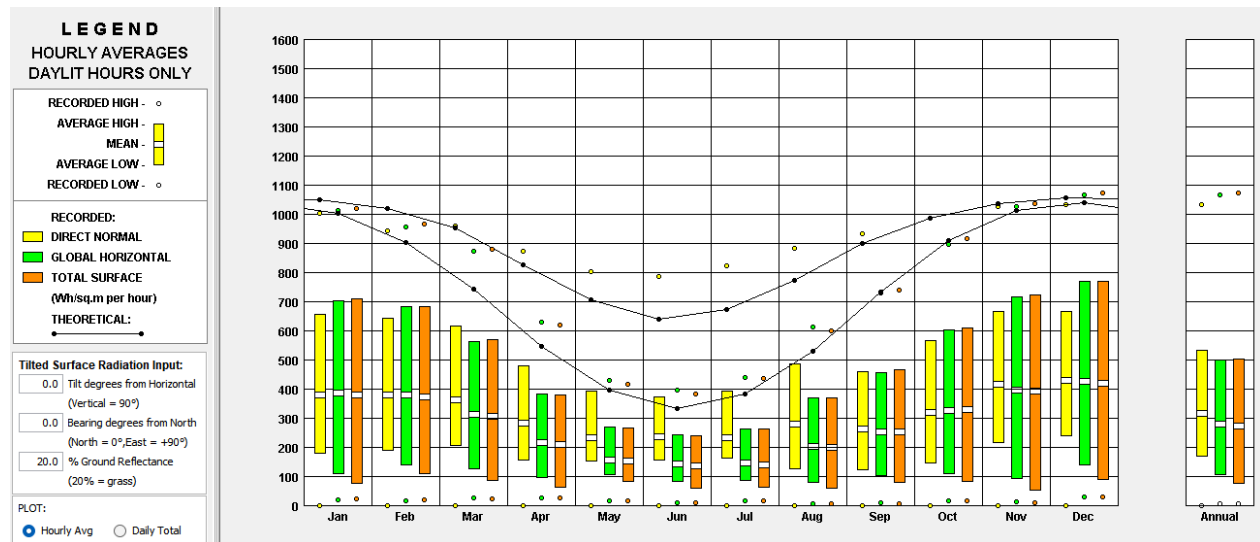


Figura 1.4: Comportamiento de la Radiación en Castro.
(Fuente: Imagen extraída de Climate Consultant 6.0)

En la Figura 1.5 se muestra el comportamiento de la nubosidad en la comuna de Castro, donde se observa que el promedio esta en todos los casos, está sobre el 65 % cubierto del cielo, llegando en el mes de mayo a un 90 % en promedio. En general, tener cielos cubiertos representa disminución de la cantidad de radiación solar, disminución de las temperaturas altas durante el día y en una mayor probabilidad de precipitaciones.

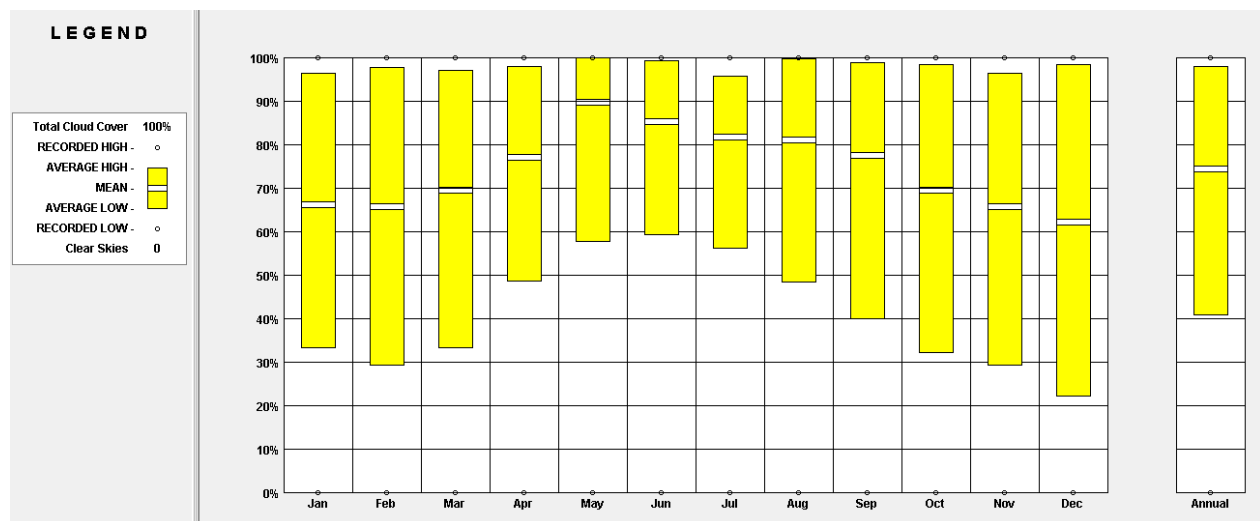


Figura 1.5: Comportamiento de la nubosidad en Castro.
(Fuente: Imagen extraída de Climate Consultant 6.0)

El estudio se enfoca en la vivienda social DS-10, en la cual se utilizan las herramientas de simulación energética OpenStudio y EnergyPlus. También se usan herramientas de cálculo en planillas Excel, para realizar la evaluación de la eficiencia de sistemas de calefacción, mejoras de aislación térmica, cantidad de infiltraciones en la vivienda y emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación intradomiciliaria y MP2,5.

1.2.1. Vivienda Social DS-10

- **Descripción:** Según se indica en la página del SERVIU (SERVIU Metropolitano, 2024), el programa habitacional DS-10 es un diseño de vivienda social. Para esta tesis se utilizan las características de sus materiales, diseño y dimensiones para la simulación del caso base. El programa consiste en otorgar una solución habitacional a familias que habitan zonas rurales o urbanas de hasta 5.000 habitantes. La vivienda consiste en un diseño base que posee dos dormitorios, un baño, cocina y estar-comedor.

Se indica en el informe del Plan de Emergencia Habitacional MINVU 2022-2023 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2023) que a junio del año 2023 había una cantidad de 255 viviendas sociales del programa DS-10 construidas en la región de los lagos de un total de 1.506 a nivel nacional. En paralelo se tenían 331 viviendas en ejecución en esta región y 6.017 a nivel nacional. Por otro lado, quedan 439 pendientes para la región y 5.166 a nivel nacional.

1.2.2. Modelado Energético con OpenStudio y EnergyPlus

- **Software Utilizado:** OpenStudio y EnergyPlus corresponden a herramientas de simulación energética que modela y entrega información sobre el comportamiento energético de la edificación evaluada.
- **Archivo Meteorológico:** Se utiliza un archivo climático que contiene los datos meteorológicos representativos de la comuna de Castro. Con esto el software sitúa la vivienda con ciertas condiciones climáticas exteriores.
- **Simplificación de Zonas Térmicas:** Para que las simulaciones puedan ser realizadas de forma rápida y también con el fin de simplificar el análisis, se utiliza una zona térmica única. Permitiendo dirigir el estudio a la eficiencia general del diseño, sin segmentación térmica interna.
- **Periodo de Simulación:** La simulación es realizada en el periodo de un año calendario.
- **Estimación de Temperatura de Confort:** Mediante el método simplificado de confort adaptativo propuesto por la ASHRAE, se realiza el cálculo de la temperatura de confort. Siendo lo anterior, relevante para la obtención de la demanda energética para que la vivienda logre esta temperatura.
- **Modelado de Horas de Operación:** Se modelan las horas en que la vivienda está ocupada por sus habitantes.
- **Modelado de Cantidad de Personas y su Generación de Energía:** Se especifica que la vivienda es habitada por 4 personas las cuales entregan 40 W.
- **Cantidad de Renovaciones de Aire:** Se realiza el cálculo de renovaciones de aire por hora óptimo para un lograr la higiene de este, y se varía para evaluar sus efectos en la demanda energética.
- **Modelado de Elementos Constructivos:** Se modelan paredes, techumbre, suelo, puertas y ventanas, asegurando que se represente de la forma más apegada a la realidad las características térmicas de cada elemento.
- **Exclusión de Generación Calórica por Objetos Eléctricos:** No se consideran emisiones de calor de ampolletas, refrigeradores, hornos y otros posibles equipos de la vivienda.

1.2.3. Sistemas de Calefacción

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el desempeño y viabilidad de diversos sistemas de calefacción residencial para satisfacer la demanda térmica en la vivienda DS-10. Los sistemas a analizar son el aire acondicionado Split inverter, estufa a parafina, estufa a pellet, calefactor oleoeléctrico, estufa a gas licuado y la estufa a leña. Para cada uno de estos sistemas, se evaluarán cinco aspectos fundamentales:

- **Costos de Operación:** Se determinará el costo asociado a la operación de cada sistema de calefacción, considerando factores como el consumo energético, el precio de los combustibles o la electricidad, y otros gastos relevantes. Esto permitirá comparar la viabilidad económica de los diferentes sistemas.

- **Índice de Cobertura de la Demanda:** Se analizará la capacidad de cada sistema para satisfacer la demanda energética de una vivienda, considerando un uso de 8 horas diarias de funcionamiento. Este análisis permitirá determinar qué sistemas son capaces de cubrir adecuadamente las necesidades de calefacción.
- **Emisiones de Material Particulado 2,5:** Se determinarán las emisiones de MP2,5 para los sistemas de calefacción evaluados.
- **Emisiones de gases de efecto invernadero:** Se determinan las emisiones de gases de efecto invernadero o toneladas de CO_2 equivalente de cada sistema de calefacción.
- **Contaminación intradomiciliaria:** Se refiere a la contaminación emitida hacia el interior de la vivienda por los sistemas de calefacción utilizados. Estos se categorizan en alta contaminación para aquellos equipos de llama abierta, como la estufa a leña, parafina y gas. Luego se presenta la categoría de contaminación moderada, la cual abarca los sistemas con tubos de escape hacia el exterior como la estufa a pellet. En último lugar se presenta la categoría de los equipos sin contaminación, que corresponde a aquellos equipos que utilizan como combustible la electricidad, como el aire acondicionado o la estufa oleoeléctrica.

Las características técnicas y de rendimiento de cada sistema de calefacción serán obtenidas de la tabla proporcionada, la cual contiene información detallada sobre los equipos evaluados. Mediante esta evaluación comparativa, se busca identificar las soluciones de calefacción más eficientes, económicas, compatibles con nuestra salud y medio ambiente y adecuadas para satisfacer las necesidades térmicas de las viviendas, considerando diferentes patrones de uso y requerimientos energéticos.

2 | Marco Teórico

En este capítulo se presenta el marco teórico que sustenta el estudio realizado. Se abordan conceptos clave relacionados con el aislamiento térmico, la eficiencia energética, los sistemas de calefacción, y su impacto en la demanda energética y el confort térmico de las viviendas. Para entender y comprender el contexto en el que se desenvuelve esta memoria, es necesario saber qué entendemos por energía, en específico, cómo son utilizadas en las viviendas para lograr un confort térmico para los habitantes de ésta.

2.1. Energía y Transferencia de Calor

La energía ha constituido una pieza clave para el desarrollo de la humanidad. El hombre, desde el principio de su existencia, ha necesitado la energía para sobrevivir y avanzar. Primero que todo, es de vital importancia definir a que nos referimos cuando se habla de energía. "La energía es la capacidad de los cuerpos para realizar un trabajo y producir cambios en ellos mismos o en otros cuerpos."(Endesa, 2024) Es decir, el concepto de energía se define como la capacidad de hacer funcionar las cosas.

2.1.1. Tipos de energía

Endesa (ibíd.) presenta los siguientes tipos de energía, las cuales son clasificadas según las acciones y los cambios que pueden provocar:

- **Energía mecánica:** Relacionada con la posición con el movimiento de los cuerpos, por tanto, involucra a las distintas energías que tiene un objeto en movimiento, como son la energía cinética y potencial.
- **Energía interna:** La energía interna se manifiesta a partir de la temperatura. Cuanto más caliente esté un cuerpo, más energía interna tendrá.
- **Energía eléctrica:** Cuando dos puntos tienen una diferencia de potencial y se conectan a través de un conductor eléctrico se genera lo que conocemos como energía eléctrica.
- **Energía electromagnética:** Esta es atribuida a la presencia de un campo electromagnético, generado por el movimiento de partículas eléctricas.
- **Energía química:** Se manifiesta en determinadas reacciones químicas cuando se rompen o forman enlaces químicos.
- **Energía nuclear:** Generada al interactuar los átomos entre sí.
- **Energía térmica:** Se asocia a la cantidad de energía que pasa de un cuerpo caliente a otro más frío manifestándose mediante el calor.

Esta última es donde radica esta problemática, debido a que el calor se puede transmitir de distintas formas en las viviendas para llegar a las condiciones térmicas deseadas.

2.1.2. Transferencia de calor

Endesa (Endesa, 2024) expone que la transferencia de calor es el proceso mediante el cual la energía térmica se mueve de un objeto a otro debido a una diferencia de temperaturas entre ellos. Esta transferencia se realiza desde un cuerpo caliente a otro cuerpo más frío. Esta energía se mueve de 3 formas principalmente:

- **Conducción:** "Cuando se calienta un extremo de un material, sus partículas vibran y chocan con las partículas vecinas, transmitiéndoles parte de su energía."(ibíd.) En este proceso, las partículas más calientes transfieren su energía térmica a las partículas más frías adyacentes. La velocidad de transferencia de calor por conducción depende de la conductividad térmica del material y del gradiente de temperatura.
- **Radiación:** "El calor se propaga a través de ondas de radiación."(ibíd.) como por ejemplo; ondas electromagnéticas, como la luz visible, la radiación infrarroja y las microondas. En este proceso, la energía térmica se transfiere de un objeto a otro sin necesidad de un medio material. La velocidad de transferencia de calor por radiación depende de la temperatura del objeto y de la distancia entre los objetos.
- **Convección:** "Que es propia de los fluidos (líquidos o gaseosos) en movimiento."(ibíd.)

Retener o liberar la energía térmica de forma óptima en una vivienda se trabaja mediante la envolvente de esta.

Como indica la Comisión Europea (Europea, 2023) la eficiencia energética en las viviendas desempeña un papel fundamental en la reducción de los costos de energía y en la mitigación del impacto ambiental. Junto a lo anterior señala que mejorar la eficiencia energética de los edificios residenciales es crucial para reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, el aislamiento térmico juega un papel clave en el rendimiento energético de las viviendas.

2.2. Vivienda, Eficiencia y Características

2.2.1. Balance de energía en viviendas

El balance de energía es utilizado para definir los requerimientos de calefacción y/o enfriamiento de la vivienda o edificación. La Cámara Chilena de la Construcción (CCHC, 2015) presenta la siguiente figura para representar los principales factores de ganancias y pérdidas de energía en verano (A) y en invierno (B).

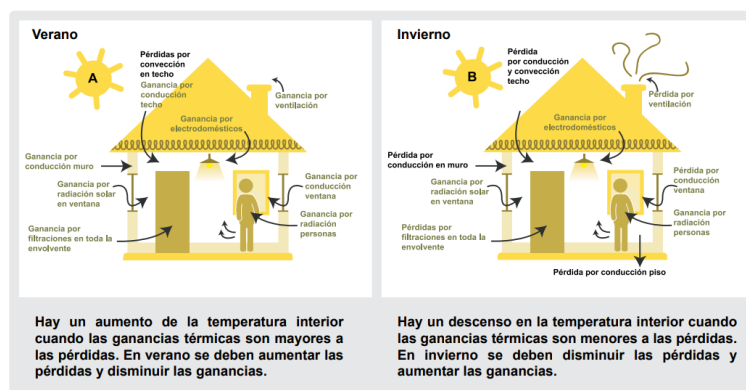


Figura 2.1: Ganancias y pérdidas de energía en verano (A) e invierno (B).

(Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico)

"Mediante el balance de energía se determina el requerimiento del acondicionamiento térmico, posteriormente se define el equipo o sistema de climatización indicado para satisfacer la demanda de la vivienda, logrando la optimización del consumo energético."(ibíd.).

Otro factor a considerar es la forma de la vivienda según indica la Cámara Chilena de la Construcción (CCHC, 2015), para abarcar este aspecto se utiliza el Factor de forma (Cf), el cual se define como el cociente entre la superficie de la envolvente expuesta al exterior (Se) y el volumen habitable (V).

$$Cf = \frac{Se}{V} \quad (2.1)$$

Lo que se interpreta como, a mayor sea el factor de forma, mayor es la demanda de energía de calefacción de la vivienda. Para explicar lo anterior se presenta el siguiente gráfico.

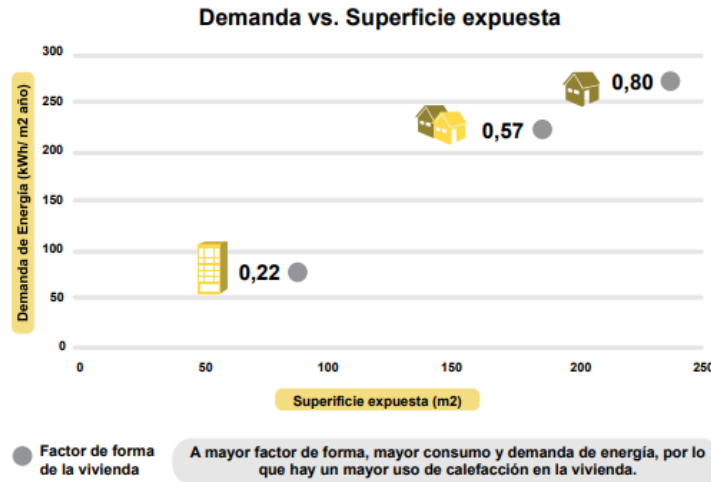


Figura 2.2: Gráfico de comportamiento de la demanda energética de la edificación vs. la superficie expuesta de esta misma.

(Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico)

2.2.2. Demanda de energía

Se define la demanda de energía en el contexto de las viviendas como "la energía necesaria para mantener las condiciones de confort térmico al interior de la vivienda. Depende de las características térmicas de la envolvente, su orientación, condiciones de uso y clima del lugar de emplazamiento. La demanda de energía de una vivienda se expresa en $\frac{kWh}{m^2 \cdot año}$. Para comparar una vivienda con otra para una misma superficie de referencia" (ibíd.) lo cual queda reflejado en las siguientes ecuaciones presentadas en el mismo texto.

$$Demanda\ de\ energía\ [\frac{kWh}{m^2 \cdot año}] = Pérdidas\ de\ Energía\ [\frac{kWh}{m^2 \cdot año}] - Ganancias\ Térmicas\ [\frac{kWh}{m^2 \cdot año}] \quad (2.2)$$

$$Demanda\ de\ energía\ [\frac{kWh}{m^2 \cdot año}] = \frac{(G_{v2} \cdot V \cdot 24 \cdot GD)}{1000} - Ganancias\ Térmicas \quad (2.3)$$

Dónde:

- Demanda de energía: Demanda medida en $[\frac{kWh}{año}]$.
- Ganancias térmicas: Ganancias medidas en $[\frac{kWh}{año}]$.
- G_{v2} : Coeficiente volumétrico global de pérdidas térmicas totales $[\frac{W}{m^3 K}]$.
- V: Volumen total de la vivienda en $[m^3]$.
- GD: Grados/día anuales en la zona térmica donde se ubica la vivienda.

$$G_{v_2} = \frac{\sum U * S + Kl * P}{V} + 0,35 * n \quad (2.4)$$

Dónde:

- U: Transmitancia térmica de cada elemento de la vivienda en $[\frac{W}{m^2 K}]$.
- S: Superficie del elemento de la vivienda en $[m^2]$.
- Kl: Transmitancia térmica lineal $[\frac{W}{m K}]$.
- P: Perímetro exterior del piso en contacto con el terreno [m].
- V: Volumen total de la vivienda $[m^3]$.
- n: Renovaciones de aire por hora en la vivienda.

"Las ganancias térmicas, provienen de la radiación solar y del calor generado en la vivienda por las personas, electrodomésticos, etc." (CCHC, 2015). En el mismo Manual de Acondicionamiento Térmico ya mencionado se presentan las siguientes evaluaciones de demanda energética para 3 tipos de viviendas y analiza la situación en un caso base sin aislación, en segundo lugar cumpliendo la reglamentación de la O.G.U.C. del año 2000 y por último las exigencias de la O.G.U.C 2007. A continuación se presentan los comportamientos analizados en el Manual.

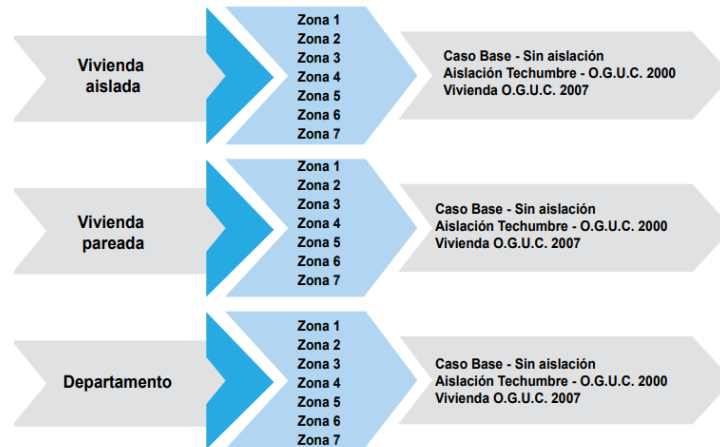


Figura 2.3: Casos considerados en las simulaciones para la situación actual.

(Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico)

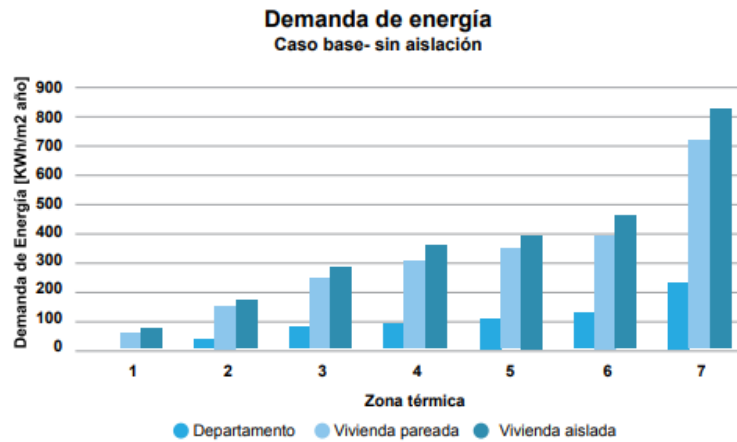


Figura 2.4: Demanda de energía por zona térmica para el Caso Base sin aislación.

(Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico.)

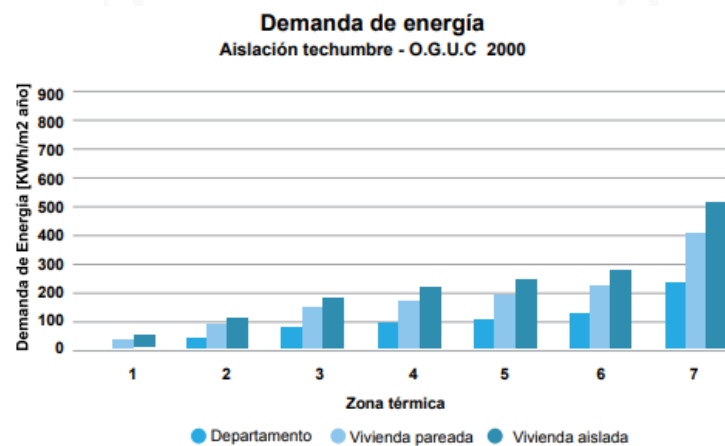


Figura 2.5: Demanda de energía por zona térmica para viviendas con aislación de techumbre según normativa de la O.G.U.C. año 2000.

(Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico.)

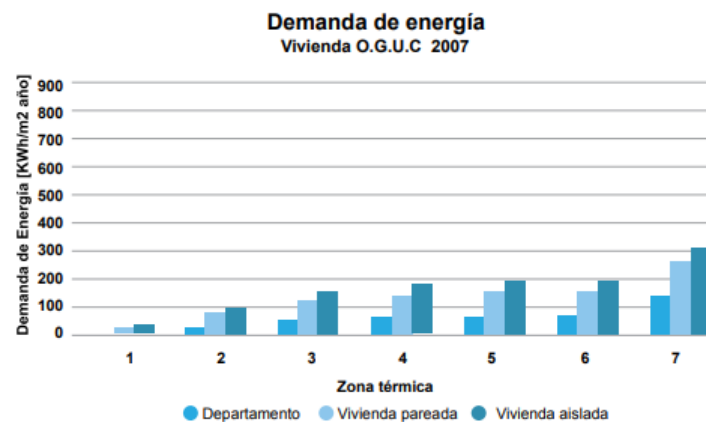


Figura 2.6: Demanda de energía por zona térmica para viviendas acondicionadas según la normativa O.G.U.C. año 2007.

(Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico.)

A partir de los gráficos anteriores es posible identificar que con la evolución de las exigencias de la normativa térmica del país se logra una evidente disminución en la demanda energética para todas las zonas del país y que este efecto sirve para viviendas con distintas características (o al menos para las 3 tipologías evaluadas).

2.2.3. Consumo de energía

Como expone el CCHC (CCHC, 2015) El consumo de energía se refiere a la cantidad de energía real necesaria para satisfacer la demanda, la cual está influenciada por la eficiencia del sistema de calefacción. Dado que la eficiencia de los sistemas utilizados generalmente es inferior al 100 %, excepto en casos como bombas de calor y calderas de condensación, el consumo tiende a ser mayor que la demanda de energía.

$$\text{Consumo} = \frac{\text{Demanda}}{\text{Eficiencia equipo}} \quad (2.5)$$

Donde la eficiencia del equipo es la proporción entre la energía aprovechada por un aparato y la que éste ha consumido para funcionar.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Energía útil}}{\text{Energía consumida}} \quad (2.6)$$

Con lo anterior se entiende que son viviendas con una iguales características térmicas, su consumo final estará dado según el equipo de climatización que este posea. Como todos los equipos se comercializan en distintos formatos, se emplea la ecuación Costo energía, la cual viene dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Costo energía}(\text{Precio por kWh}) = \frac{\text{Precio del combustible}}{\text{Poder calorífico del combustible}} \quad (2.7)$$

Siendo el poder calorífico "la cantidad de energía que puede liberar un combustible unido a un comburente (oxígeno) al realizarse combustión."(ibí.d.). A continuación se presenta una tabla que muestra el comportamiento referido anteriormente.

	Estufa a leña	Estufa a parafina	Caldera a gas natural	Calefactor eléctrico
Tipo de calefacción				
Eficiencia del equipo	0,6 ^a	0,6 ^a	0,9 ^a	1,00
Consumo de energía [kWh/ m² año]	167	167	111	100
Costo del kWh generado por tipo de combustible [\$ / kWh]	\$33	\$64	\$73	\$102 / \$134
Precio útil de la energía [\$ / kWh]	\$55	\$107	\$81	\$102 / \$134
Costo anual [\$ / m² año]	\$5.511	\$10.688	\$8.103	\$10.200 / \$13.400

Figura 2.7: Tabla de consumo de energía para distintos tipos de calefacción.

(Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico.)

De lo anterior, es importante reconocer que el precio útil de la energía y el costo anual son los valores de mayor relevancia. El precio útil es el costo del kWh generado dividido por la eficiencia del equipo, gracias a lo cual se tiene el costo real de la energía por kWh del equipo en particular.

$$\text{Precio Util Energía} = \frac{\text{Precio Combustible}(kWh)}{\text{Eficiencia equipo de calefaccion}} \quad (2.8)$$

“El equipo que menor energía requiere para proveer los 100 [$\frac{kWh}{m^2 \cdot año}$] es, en este ejemplo, el calefactor eléctrico, puesto que tiene la mayor eficiencia entre estos equipos, mientras que un mayor consumo, de casi el doble (167 kWh), lo tiene la estufa a leña. El menor costo se obtiene al utilizar la estufa a leña con sólo \$5.511 por [$m^2 \cdot año$], debido al bajo valor del combustible”(CCHC, 2015).

2.2.4. Eficiencia Energética

La eficiencia energética en el contexto de las viviendas viene dado por: “Relación entre la cantidad de energía consumida y el producto final obtenido. Dicho producto final consiste en: calefacción apropiada, iluminación, producción de agua caliente sanitaria y confort térmico.” (Vivienda y Urbanismo, 2019a). Dado lo anterior, la relevancia de la eficiencia energética en sector residencial radica en, “La calidad térmica de las viviendas es muy relevante en relación al uso eficiente de la energía de nuestros hogares. En este sentido, las estadísticas muestran que en el ámbito residencial se consume alrededor del 20 % de la energía total utilizada en el país.”(Desarrollo Tecnológico, 2016). En otras palabras se indica que el 66 % de la energía primaria utilizada en Chile depende de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), siendo estos recursos no renovables, teniendo un impacto negativo en el medio ambiente.

2.2.5. Desempeño energético

Según lo indicado en el Manual de Acondicionamiento Térmico (CCHC, 2015), el desempeño energético se mide en relación al requerimiento de energía para lograr el nivel óptimo de confort térmico. Para trabajar con el desempeño energético de una vivienda, hay que tener en conocimiento la diferencia entre potencial del desempeño energético y el desempeño final que tendrá la vivienda. El potencial del desempeño energético viene dado por los materiales con que está construida, el nivel de aislación, la orientación, la superficie expuesta al exterior (factor de forma), el clima y la eficiencia de los equipos de calefacción. Por otro lado, el desempeño final trabaja con el potencial del desempeño sumado a el uso de la vivienda, el nivel de mantención, la calidad del aire interior, etc.

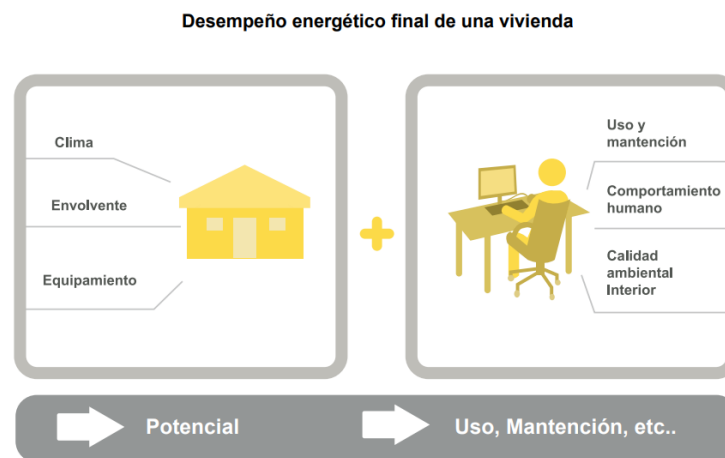


Figura 2.8: Procesos de transferencia de calor en una vivienda.

(Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico)

Las viviendas se encuentran sometidas constantemente a cambios climáticos del exterior, donde hay factores tales como variación de la temperatura, humedad, radiación solar y velocidad del viento. Lo anterior genera constantes procesos de transferencia, captura y almacenamiento de calor en la vivienda.

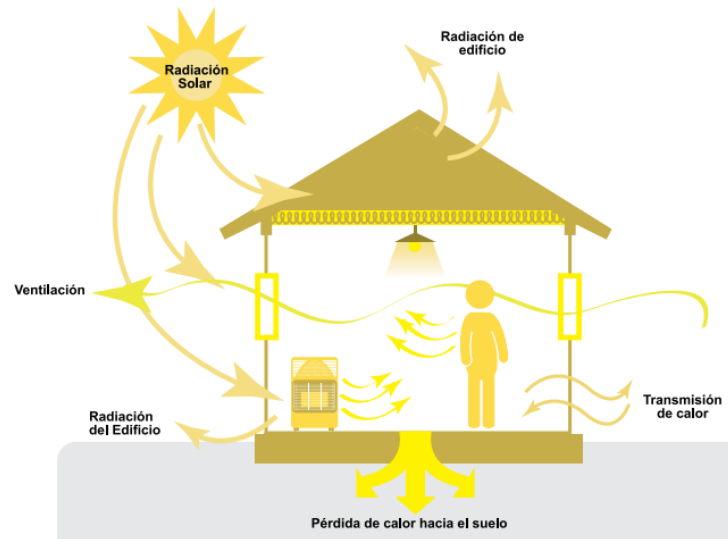


Figura 2.9: Pasos para realizar la postulación.

(Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico)

2.2.6. Calificación energética

El Manual Acondicionamiento Térmico de la Cámara Chilena de la Construcción (CCHC, 2015) expone el actual Sistema de Calificación Energética de Viviendas MINVU (CEV), la cual funciona comparando la vivienda con una de referencia, de este modo es posible clasificarla en uno de los 7 niveles (desde la A siendo este el más eficiente hasta la G siendo el menos eficiente) de eficiencia energética. Hoy en día se utiliza la letra E como el estándar mínimo definido en el artículo 4.1.10 de la O.G.U.C. para aislación de muros, pisos ventilados y techo. Hoy en día la CEV es de uso voluntario, considerando requerimientos de calefacción, iluminación y agua caliente sanitaria, esta calificación consiste en dos etapas:

- **Pre-calificación energética:** "Se realiza en proyectos de arquitectura que tengan permiso de edificación aprobado por el director de Obras Municipales. Es provisoria y su vigencia es válida hasta que el proyecto obtenga la recepción municipal definitiva."(ibíd.).
- **Calificación energética:** "Corresponde a la evaluación final y definitiva de la obra terminada. Para emitirla se califica nuevamente el proyecto, según los planos y especificaciones técnicas finales, con recepción municipal aprobada por el director de Obras Municipales, y la documentación adicional acreditada por el propietario. Tiene una duración de 10 años, o hasta que se realice alguna modificación que altere los parámetros con los que fue evaluada la vivienda." (ibíd.).

A continuación se presentan los formatos de la pre-calificación y la calificación energética.

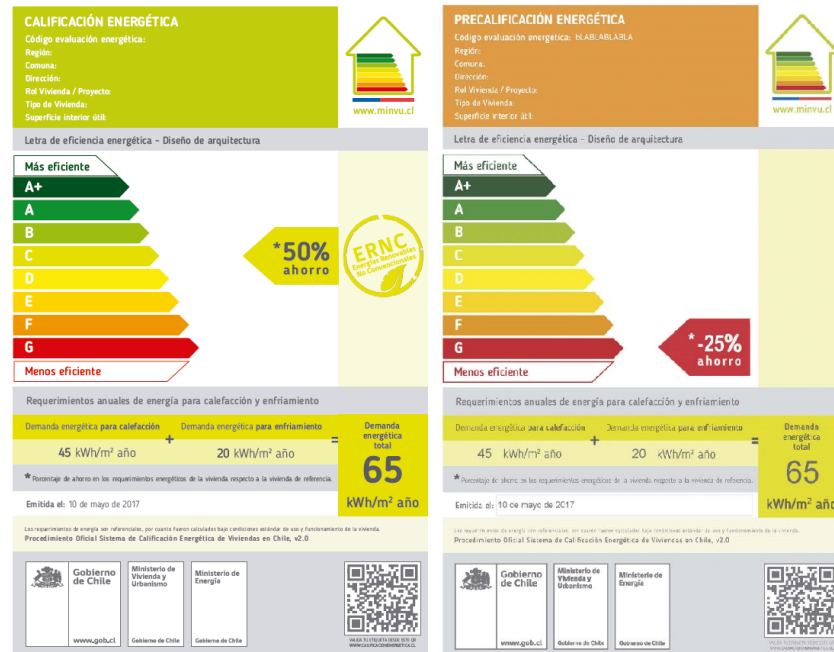


Figura 2.10: Etiqueta de calificación energética y etiqueta de pre-calificación energética.

(Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico)

Tanto en la Pre-calificación como en la Calificación, la vivienda obtendrá dos letras finales incluidas en la etiqueta. La primera letra corresponde a la calificación de arquitectura y la segunda letra a la calificación de arquitectura + equipos + tipo de energía.

2.3. Confort y Envolverte Térmica

Se define la envolvente térmica como "Serie de elementos constructivos a través de los cuales se produce el flujo térmico entre el ambiente interior y el ambiente exterior del edificio. Está constituida básicamente por los complejos de techumbre, muros, pisos y ventanas" (CCHC, 2015). Estos límites son dados por materiales que poseen cierta capacidad que se denomina resistencia térmica, definida como "Oposición al paso de calor que presentan los elementos o materiales de construcción." (ibíd.). La cual tiene unidades de medida en $\frac{m^2 \cdot K}{W}$. En esta misma línea se identifica la transmitancia térmica o coeficiente global de transferencia de calor (U), el cual se define como "flujo de calor que pasa por unidad de superficie del elemento y por grado de diferencia de temperatura entre los dos ambientes separados por dicho elemento. Corresponde al inverso de la resistencia térmica total RT de un elemento y se expresa en $\frac{W}{m^2 \cdot K}$." (ibíd.).

Diversas investigaciones han demostrado el impacto del aislamiento térmico en el consumo de energía en edificios residenciales. Inarquía es una empresa que presta servicios especializados a empresas de construcción industrializada, modular y pasiva, en su página web habla sobre la relevancia de la aislación térmica, donde mencionan lo siguiente, "El ahorro de energía que genera un buen aislante térmico se traduce en una reducción de las necesidades energéticas de la vivienda, y por tanto, en una reducción en la factura eléctrica, que dependerá en gran medida de las características de la envolvente del edificio." (Inarquía, 2024).

2.3.1. Transferencia de calor por la envolvente debido a diferencia de temperatura

"En un objeto de geometría plana, se transfiere calor desde la cara más caliente a la más fría por conducción. Se pierde calor por conducción en invierno, a través del techo, los muros, el piso y las ventanas. Cuando la temperatura exterior es menor que la interior. De forma inversa, se gana calor por conducción en verano cuando la temperatura

exterior es mayor que la interior.”(CCHC, 2015). Se presenta la siguiente figura para representar el comportamiento anteriormente mencionado.

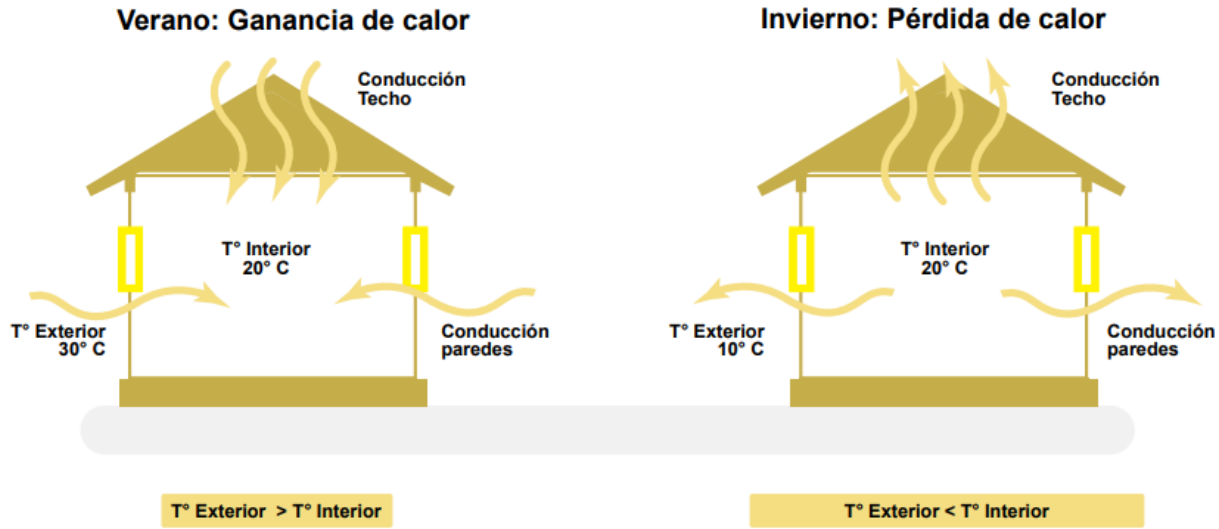


Figura 2.11: Conducción en una vivienda en verano (izquierda) e invierno (derecha).

(Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico)

En el contexto de la transferencia de calor, se deben definir los conceptos que se presentan a continuación:

- **Conductividad térmica, λ :** Se define como "Cantidad de calor que en condiciones estacionarias pasa en la unidad de tiempo a través de la unidad de área de una muestra de material homogéneo de extensión infinita, de caras planas y paralelas y espesor unitario. Cuando se establece una diferencia de temperatura unitaria entre sus caras. Se expresa en $\frac{W}{m \cdot K}$ " (ibíd.).
- **Resistencia térmica, RT :** "Para calcular la resistencia térmica total (RT) de un elemento homogéneo simple o compuesto, se deben considerar las resistencias de los distintos materiales que lo componen. Incluyendo las resistencias superficiales y la resistencia de la cámara de aire si corresponde." (ibíd.)

$$R_T = R_{se} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + R_g + R_{si} \quad (2.9)$$

Donde:

- R_T : Resistencia térmica total del elemento, en $[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$.
- R_{se} : Resistencia de la superficie exterior del elemento, en $[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$.
- e_i : Espesor del material i que compone el elemento, en $[m]$.
- λ_i : Conductividad térmica del material que compone el elemento, en $[\frac{W}{m \cdot K}]$.
- R_g : Resistencia de una cámara de aire $[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$.
- R_{si} : Resistencia de la superficie interior del elemento, en $[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$.

2.3.2. Confort Térmico

Según el estándar definido por la ASHRAE 55 (*ASHRAE Standard 55-2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy 2004*), cuando se habla de confort térmico se refiere a la encontrar la mínima condición de

comodidad para el usuario de una vivienda, esto basado en un equilibrio entre las ganancias y pérdidas térmicas del cuerpo, generando una sensación de bienestar físico, el cual está relacionado a varios factores, tales como:

- **Temperatura del aire ambiente que rodea a la persona:** Actúa directamente en el intercambio de calor por convección.
- **Humedad relativa del aire ambiente:** Actúa sobre la posibilidad de intercambiar calor por evaporación del sudor. Mientras menor es la humedad relativa, más fácil es la evaporación y por lo tanto no se genera la capa líquida de sudor molesto.
- **Temperatura de las superficies internas que rodean a la persona:** Define la temperatura radiante, la cual intercambia energía entre al sujeto y la respectiva superficie.
- **Velocidad del aire ambiente:** También actúa sobre la evaporación de sudor. A mayor velocidad, aumenta la evaporación y por tanto permite evitar el líquido sobre la piel.
- **Actividad física de las personas:** Se refleja en el metabolismo de la persona, a mayor actividad física se genera más calor en el cuerpo humano, pudiendo disminuir la sensación de frío.
- **Tipo de vestimenta:** Reduce el intercambio de calor por aislación, pues un ambiente de temperatura bajo en confort, obliga a aumentar ésta.

Sin embargo, esta condición de confort térmico es relativo a cada persona. Estando sujeto a las condiciones ambientales previas con las que ingresa la persona al espacio. Este efecto de incomodidad a la nueva exposición puede tener una duración aproximadamente de una hora. Bajo las premisas anteriormente expuestas, se trabaja con el modelo de **confort adaptativo** presentado en el Manual de Procedimiento Calificación Energética de Viviendas en Chile (Vivienda y Urbanismo, 2019a) para determinar la temperatura de confort:

$$T_n[C] = A + B * T_m \quad (2.10)$$

- T_n : corresponde a la temperatura interior media de confort.
- T_m : corresponde a la temperatura media mensual exterior.
- A;B: son constantes.

Junto a lo anterior se establecen los siguientes criterios como rangos de confort térmicos aceptables:

- T_n+3 : Caliente.
- T_n+2 : Tibio.
- T_n+1 : Levemente tibio.
- T_n : Neutral.
- T_n-1 : Levemente fresco.
- T_n-2 : Fresco.
- T_n-3 : Frío.

”Donde en un rango de 2,5 °C sobre o bajo la temperatura neutral se tiene un 90 % de aceptabilidad de la temperatura por parte de los usuarios.”(ibíd.) Este modelo cuenta con tres métodos para el cálculo, los cuales son expuestos en el Manual de Procedimientos Calificación Energética de Viviendas en Chile. Presentando como modelos comparativos los siguientes:

2.3.2.1. Método citado por Andris Auliciems y Steven V. Szokolay

”Se propone una banda de confort donde las constantes A y B definidas anteriormente corresponden a 17,8 y 0,31” (ibíd.).

2.3.2.2. Método simplificado de confort adaptativo

”La ASHRAE propone una banda de confort donde las constantes A y B definidas anteriormente corresponden a 17,8 y 0,31. Dicho modelo se encuentra acotado a temperaturas medias exteriores mínimas de 10 °C y máximas de 33 °C, y no señala extrapolaciones para dichos rangos.”(Vivienda y Urbanismo, 2019a).

2.3.2.3. Método propuesto por Dear y Brager, citado en ASHRAE

”Se propone una banda de confort donde las constantes A y B definidas anteriormente corresponden a 18,9 y 0,255.” (ibíd.).

2.3.2.4. Comparación del comportamiento de cada método

El Manual de Procedimientos Calificación Energética de Viviendas en Chile (ibíd.) muestra el siguiente gráfico comparativo entre los tres métodos anteriormente expuestos:

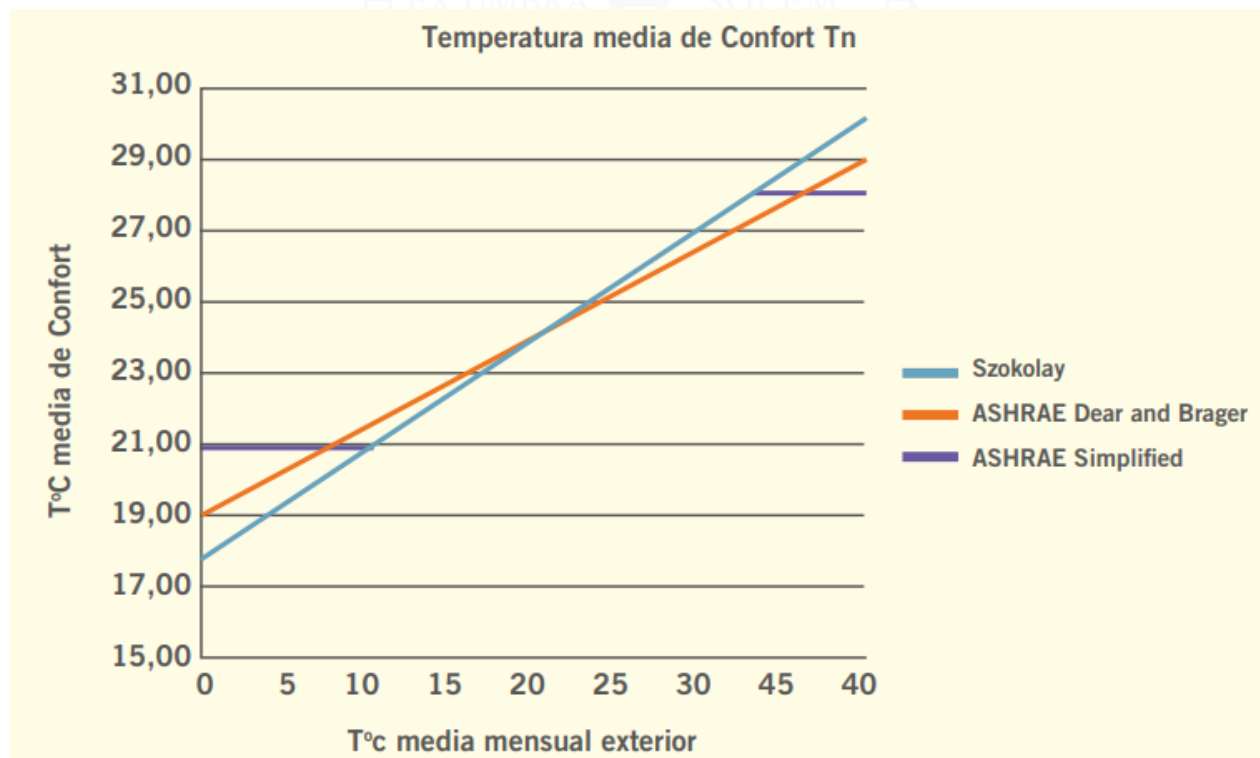


Figura 2.12: Temperatura de confort neutral T_n .

(Fuente: Manual de Procedimientos Calificación Energética de Viviendas en Chile.)

”Estas tres ecuaciones se traducen en las siguientes T° mínimas y máximas para las diez zonas térmicas a considerarse en Chile para el mes de julio y enero, representativos del mes más frío y caluroso del año.” (ibíd.). Presentando la siguiente tabla:

Tabla 2.1: Temperaturas máximas de enero y mínimas de julio en diez zonas térmicas.

(Fuente: Manual de Procedimientos Calificación Energética de Viviendas en Chile.)

Zona Térmica	Ciudad Representativa	Enero (Temperatura máxima)			Julio (Temperatura mínima)		
		Szkolay	Ashrae Dear y Brager	Ashrae Simplificado	Szkolay	Ashrae Dear y Brager	Ashrae Simplificado
A	Iquique	26,77	26,73	26,77	20,02	20,50	20,02
B	Copiapó	26,24	26,29	26,24	18,77	19,51	18,77
C	Valparaíso	26,02	26,10	26,02	18,99	19,58	18,99
D	Santiago	26,60	26,58	26,60	17,97	18,55	18,40
E	Concepción	25,71	25,85	25,71	17,27	18,70	18,40
F	Temuco	25,74	25,88	25,74	17,65	18,39	18,40
G	Osorno	25,42	25,61	25,42	17,47	18,39	18,40
H	El Teniente	25,13	25,37	25,13	16,68	17,63	18,40
I	Punta Arenas	24,04	24,47	24,04	16,03	17,03	18,40
B2	Calama	25,26	25,48	25,26	18,20	18,43	18,40

2.4. Caracterización del Consumo de Energía en el Sector Residencial y Viviendas Sociales

Para contextualizar el sector energético se presenta la siguiente información "El sector residencial consume anualmente 50.763 GWh y el consumo promedio nacional de una vivienda equivale a 8.083 kWh al año de energía final (incluyendo todos los energéticos). Un 39,6 % del consumo se asigna al uso de Leña como energético, seguido con un 31,4 % de consumo de Gas (GLP + GN), mientras que el 25,7 % corresponde a Electricidad, un 2,6 % a Parafina y un 0,8 % al pellets." (In-Data, 2019). Representando la siguiente información del documento Usos finales y curva de oferta de conservación de la energía en el sector residencial de Chile, 2018 realizado por In-Data Spa, CDT.:

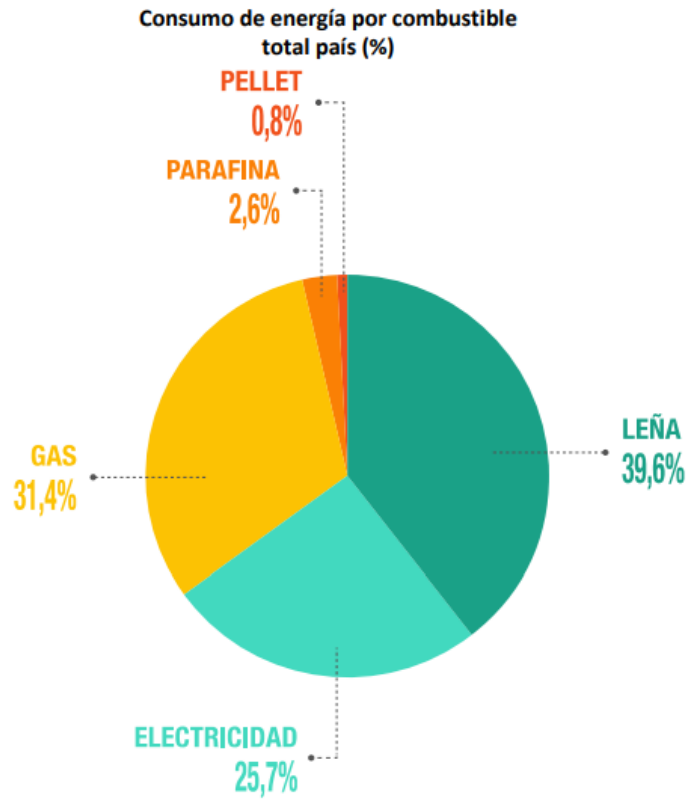


Figura 2.13: Gráfico que muestra la distribución de combustibles usados para generar la energía residencial.

(Fuente: Informe final de usos de la energía de los hogares Chile 2018.)

Por otro lado, se indica que "Del consumo energético residencial distribuido porcentualmente según uso final de la energía, se obtiene que, el 53 % se destina a calefacción y climatización (calefactores individuales, calefacción central y A/C)." (In-Data, 2019). De lo anterior la repartición de uso de energía queda presentada en el siguiente gráfico.

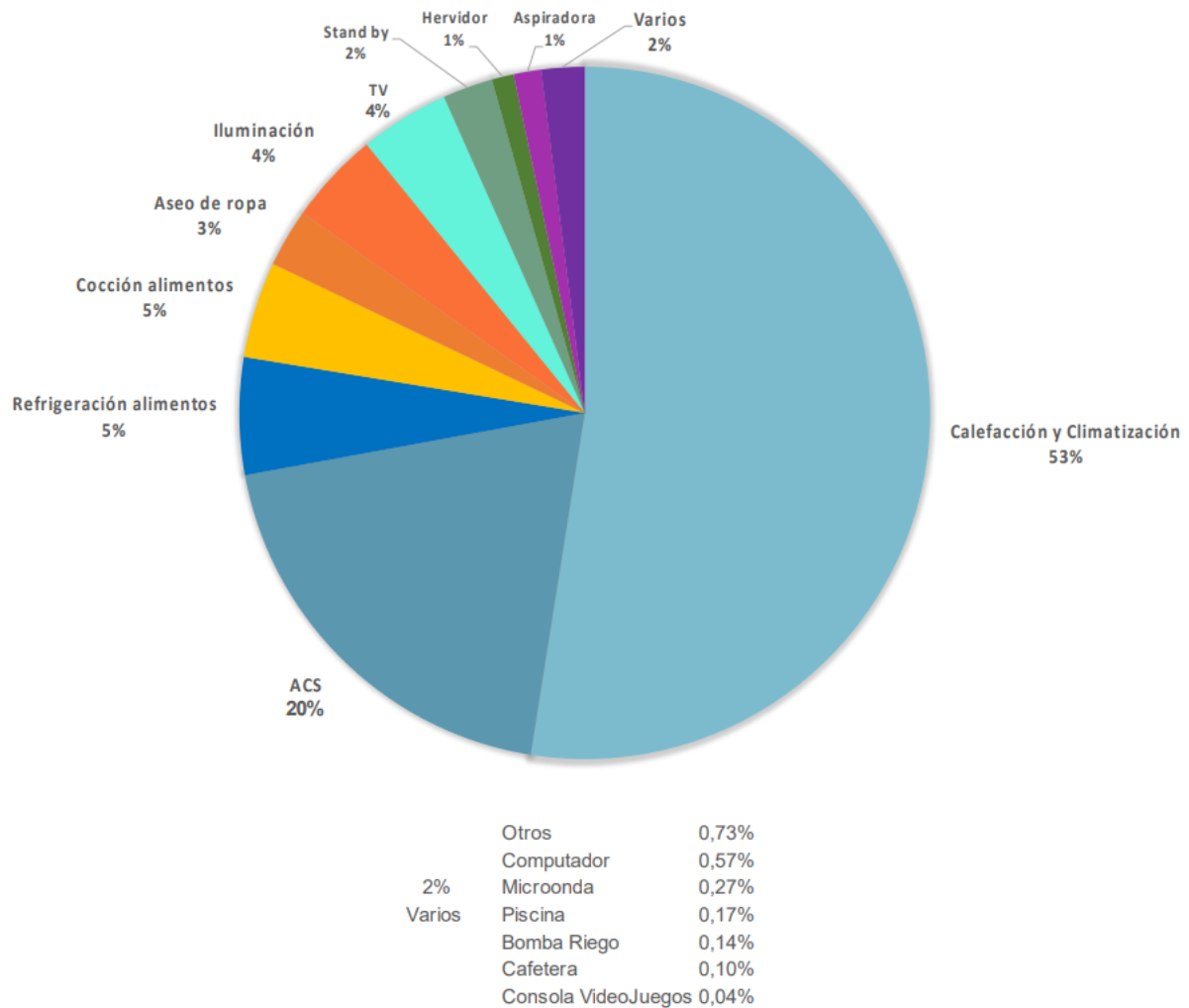


Figura 2.14: Gráfico que muestra el uso de la energía residencial.

(Fuente: Informe final de usos de la energía de los hogares Chile 2018.)

En cuanto al contexto de uso energético desglosado por zona térmica, se menciona lo siguiente "Visto por ZT, el agua caliente sanitaria y en particular calefacción/climatización, son los usos que mayor variabilidad presentan asociado a los diferentes requerimientos climáticos del territorio nacional. La ZT7 presenta los mayores porcentajes de consumos en calefacción y agua caliente sanitaria." (In-Data, 2019). En el siguiente gráfico se presenta su comportamiento:

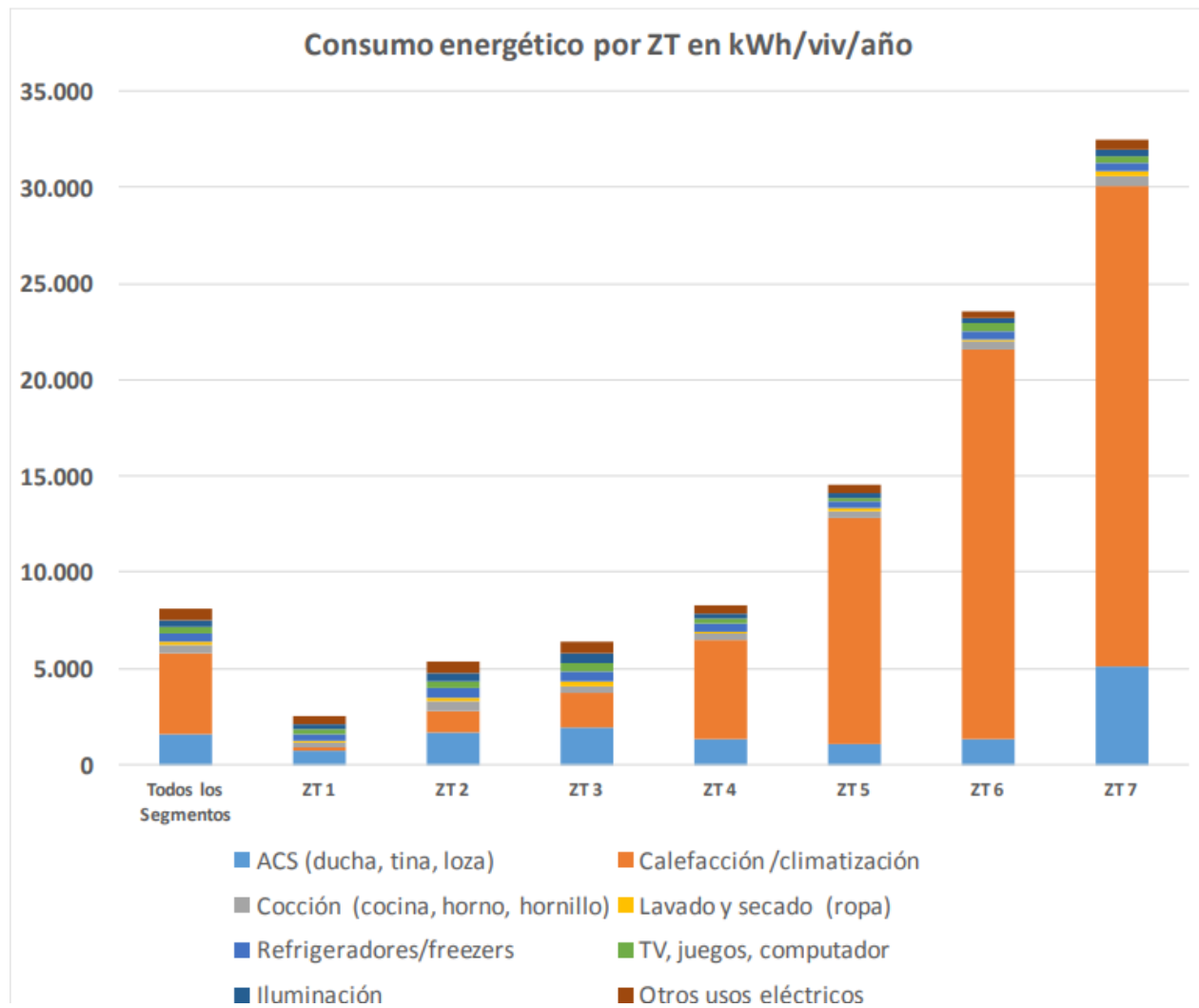


Figura 2.15: Gráfico de la energía residencial utilizada, clasificada según su uso final y la zona térmica.

(Fuente: Informe final de usos de la energía de los hogares Chile 2018.)

En la Figura 2.15 se observa una tendencia de crecimiento en el uso de energía en calefacción a medida que se avanza en las zonas térmicas del país, esto se relaciona directamente con los grados día, entre más al sur (ZT mayor), se tiene una mayor diferencia de temperaturas con la llamada temperatura de confort.

En la Figura 2.16 se presentan los porcentajes de pérdida de calor de una vivienda sin acondicionamiento térmico, para lo cual se identifican como principales elementos la techumbre y los muros con un 43 % y un 32 % respectivamente, dejando el 25 % restante entre ventanas, infiltraciones y piso.

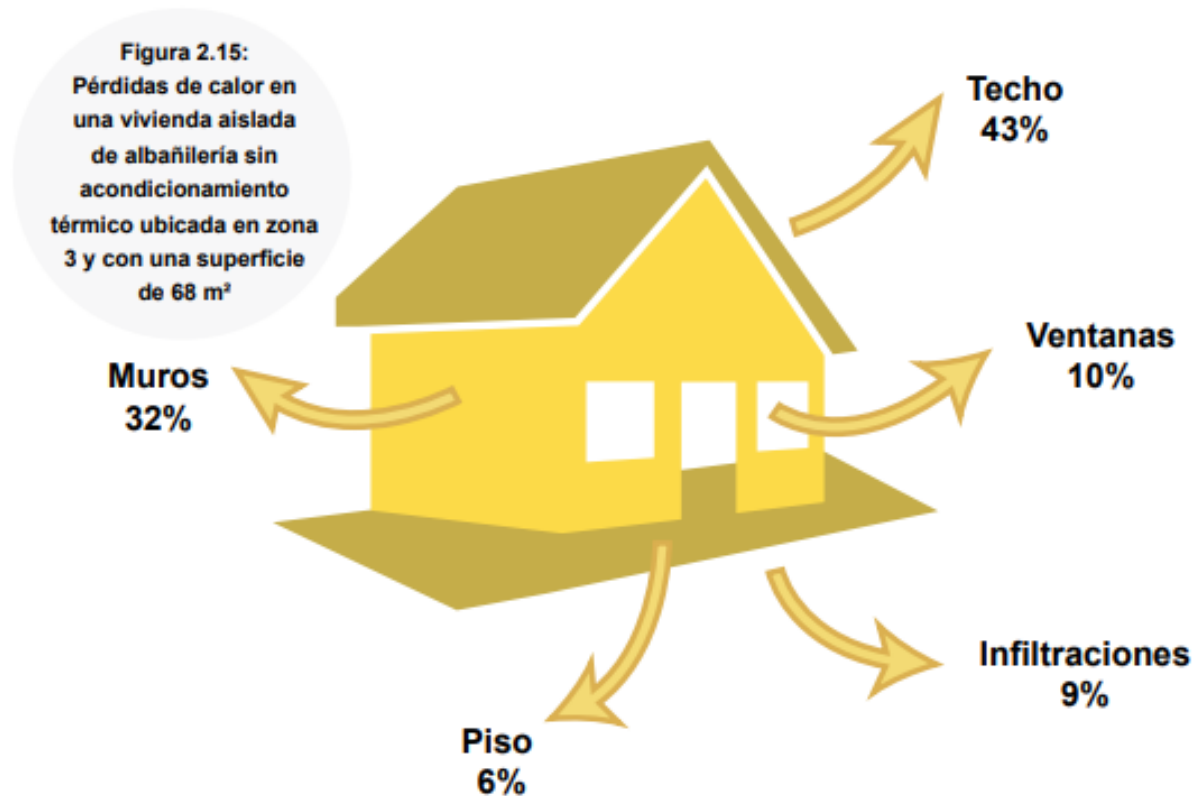


Figura 2.16: Se presentan los porcentajes de pérdida de energía de la vivienda según sección constructiva.

(Fuente: Manual de Acondicionamiento Térmico)

Para trabajar y mejorar la eficiencia del consumo de energía en el sector residencial se abordan 2 principales puntos relacionados a las pérdidas de calor de las viviendas, que se presentan a continuación.

2.4.1. Materiales de Aislación

El manual de acondicionamiento térmico expuesto por la Cámara Chilena de la Construcción (CCHC, 2015) presenta una lista de materiales de aislación. Es importante un buen desempeño en las siguientes cualidades, conductividad térmica λ , la resistencia a la humedad, al paso del vapor, su comportamiento ante el fuego, su resistencia, durabilidad, la facilidad de su correcta instalación y su relación con el medio ambiente. A continuación se presentan los materiales de aislación más usados en Chile resumidos en una tabla con sus características:

Tabla 2.2: Tabla de caracterización de materiales.

(Fuente: Manual de acondicionamiento térmico)

	Poliéstereno expandido	Lana mineral	Lana de vidrio	Poliuretano expandido	Corcho Natural
Instalación	Rápida	Rápida	Rápida	Rápida	Media
Daño	Ninguno	Ojos, manos y pulmones	Ojos, manos y pulmones	Liberación de gases nocivos	Ninguno
Vida útil	Indefinida	Indefinida	Indefinida	Indefinida	Indefinida
Resistencia al fuego	Autoextinguible (se quema, pero no se mantiene la combustión si se quita la fuente del fuego)	No combustible	No combustible	Autoextinguible, difícilmente combustible	Inflamable
Resistencia a la humedad	Alta	Bajo	Media	Impermeable	Impermeable
Compatibilidad con otros materiales	Yeso - Cal - Cemento - Aceites de silicona - Asfalto sin disolvente	Fibra de vidrio - Yeso - Madera - Prepintado de acero galvanizado - Aluminio - Cobre	Yeso - Madera - Aluminio - Papel Kraft	Metales	Yeso - Madera Aluminio
Densidad [kg/m³][20°C]	10/15/20/30	40/70/120	10/11/12	25/30/45/70	100/200/400/500
Conductividad térmica lambda [W/(m*K)]	0,043/0,0413/0,0384/0,0361	0,042/0,038/0,042	0,044/0,0424/0,041	0,0272/0,0262/0,0245/0,0274	0,04/0,047/0,066/0,074
Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua [mu adimensional]	25,1 - 46	1,7 - 1,9	1,6	17,5 - 33,5	
Resistencia a la difusión de vapor de agua (r_v) [MN*s/(g*m)]	138 - 253	9,6 - 10,5	9	96 - 184	92
Apariencia	Blanco - Limpio	Gris verdoso- Claro	Amarillo	Espuma amarillo claro	Café

2.4.2. Renovaciones de aire

Como indica el Manual de Diseño para Soluciones en Edificaciones (Construcción, 2008) hay un mínimo de ventilaciones necesarias para cada sección de las viviendas, esto velando por la higiene del aire de la vivienda, ya sea por olores, humos, etc. A continuación, se presentan los valores estándar de ventilación según zona de la vivienda.

Tabla 2.3: Tabla renovaciones de aire por hora.

(Fuente: Manual de diseño para soluciones en edificaciones.)

Renovaciones de aire por hora para diferentes lugares	
Lugar	n
Baño público	60
Gimnasio	10
Dormitorio	0,5 - 1
Living	3 - 5
Comedor	3 - 5
Cocina	5-10
Baño casa	5-15

Para calcular las pérdidas de calor por ventilación o renovaciones de aire por hora se utiliza la Ecuación 2.11 que se presenta a continuación:

$$Perdidas\ por\ ventilacion = Calor\ especifico\ del\ aire * la\ cantidad\ de\ renovaciones\ de\ aire\ por\ hora\ (n) \quad (2.11)$$

”Es importante reducir al mínimo las pérdidas por ventilación, sin embargo, un mínimo de ventilación es necesaria para la higiene de la vivienda, especialmente en ciertos espacios. En la cocina, por ejemplo, es necesaria una

salida de humos y ventilar para eliminar los olores propios de la actividad culinaria. En el baño también es necesario ventilar por la misma razón"(Construcción, 2008).

2.4.3. Vivienda Social DS-10

Se define una vivienda social como "la vivienda económica de carácter definitivo, cuyas características técnicas se señalan en este título, cuyo valor de tasación no sea superior a 400 unidades de fomento, salvo que se trate de condominios de viviendas sociales en cuyo caso podrá incrementarse dicho valor hasta en un 30 %." (1992).

2.4.3.1. Programa Habitabilidad Rural (DS-10)

Según se indica EL SERVIU (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2024) en su pagina web este programa consiste en un subsidio a familias con necesidad de una solución habitacional aplicable tanto para zonas rurales como urbanas de hasta 5.000 habitantes. Reconociendo principalmente particularidades culturales, geográficas y productivas de estos territorios y de quienes residen en ellos.

2.4.3.2. Diseño Vivienda Social DS-10

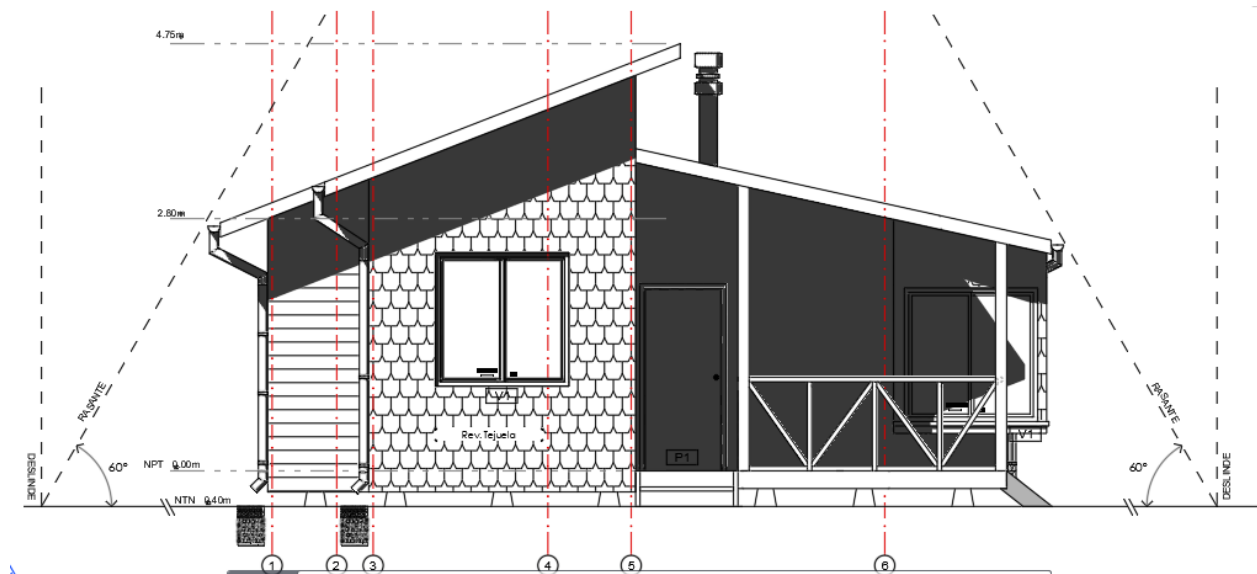


Figura 2.17: Elevación frontal de vivienda social DS-10.

(Fuente: Diseño en AutoCAD proveniente de SECPLAN de la ciudad de Chonchi, por el arquitecto Marco Marquez)

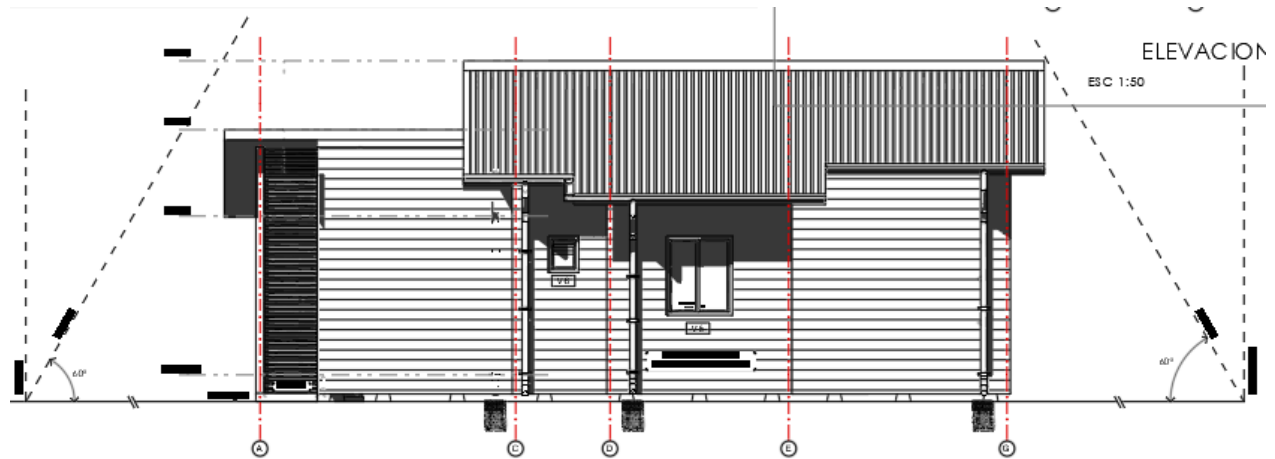


Figura 2.18: Elevación lateral derecha de vivienda social DS-10.

(Fuente: Diseño en AutoCAD proveniente de SECPLAN de la ciudad de Chonchi, por el arquitecto Marco Marquez)

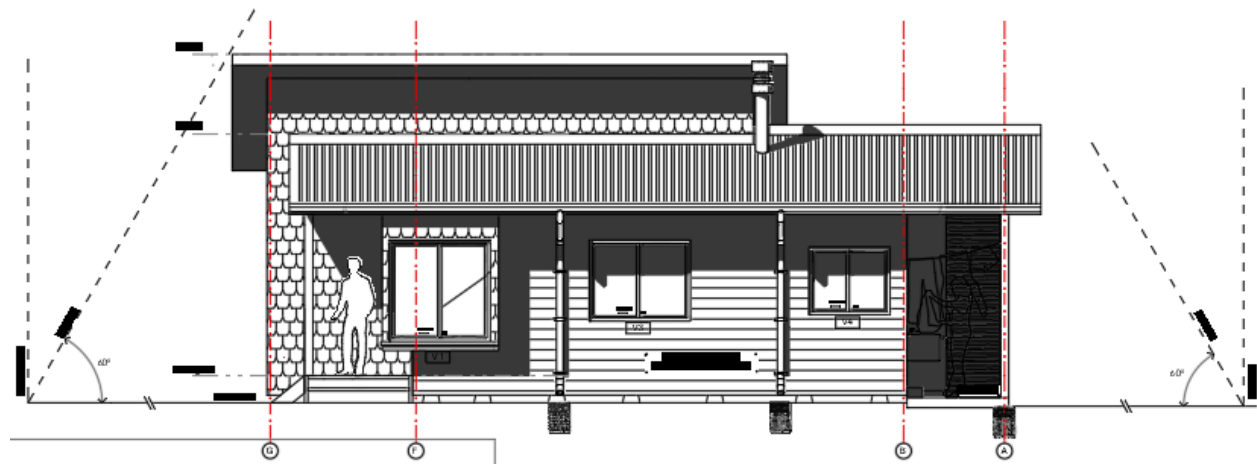


Figura 2.19: Elevación lateral izquierda de vivienda social DS-10.

(Fuente: Diseño en AutoCAD proveniente de SECPLAN de la ciudad de Chonchi, por el arquitecto Marco Marquez)

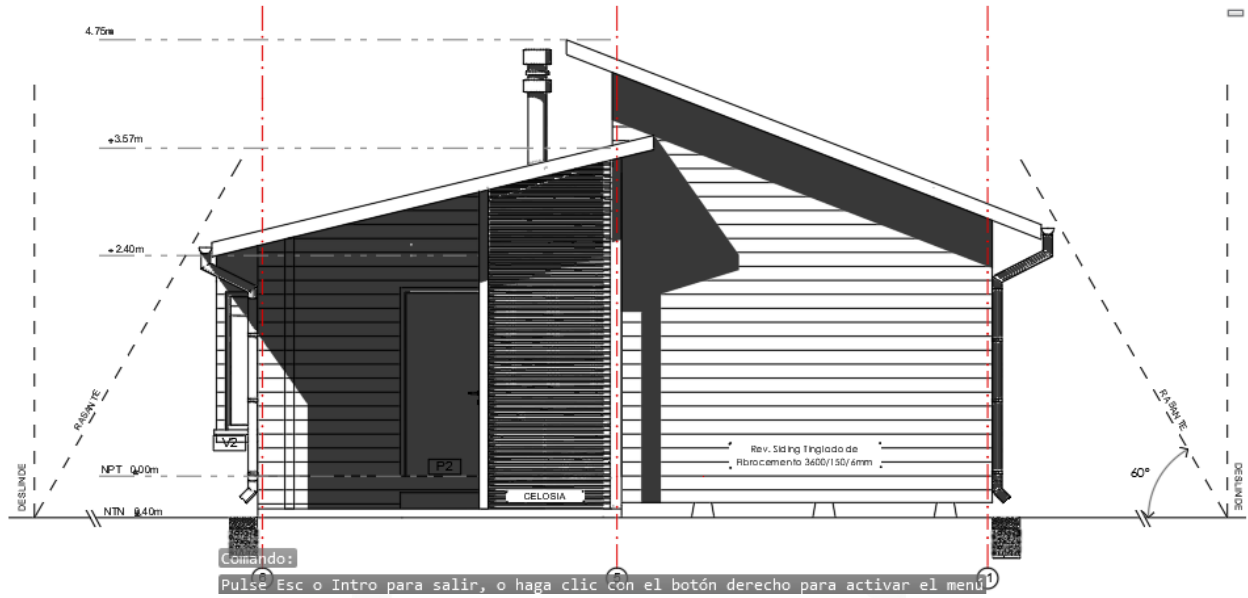


Figura 2.20: Elevación posterior de vivienda social DS-10.

(Fuente: Diseño en AutoCAD proveniente de SECPLAN de la ciudad de Chonchi, por el arquitecto Marco Marquez)

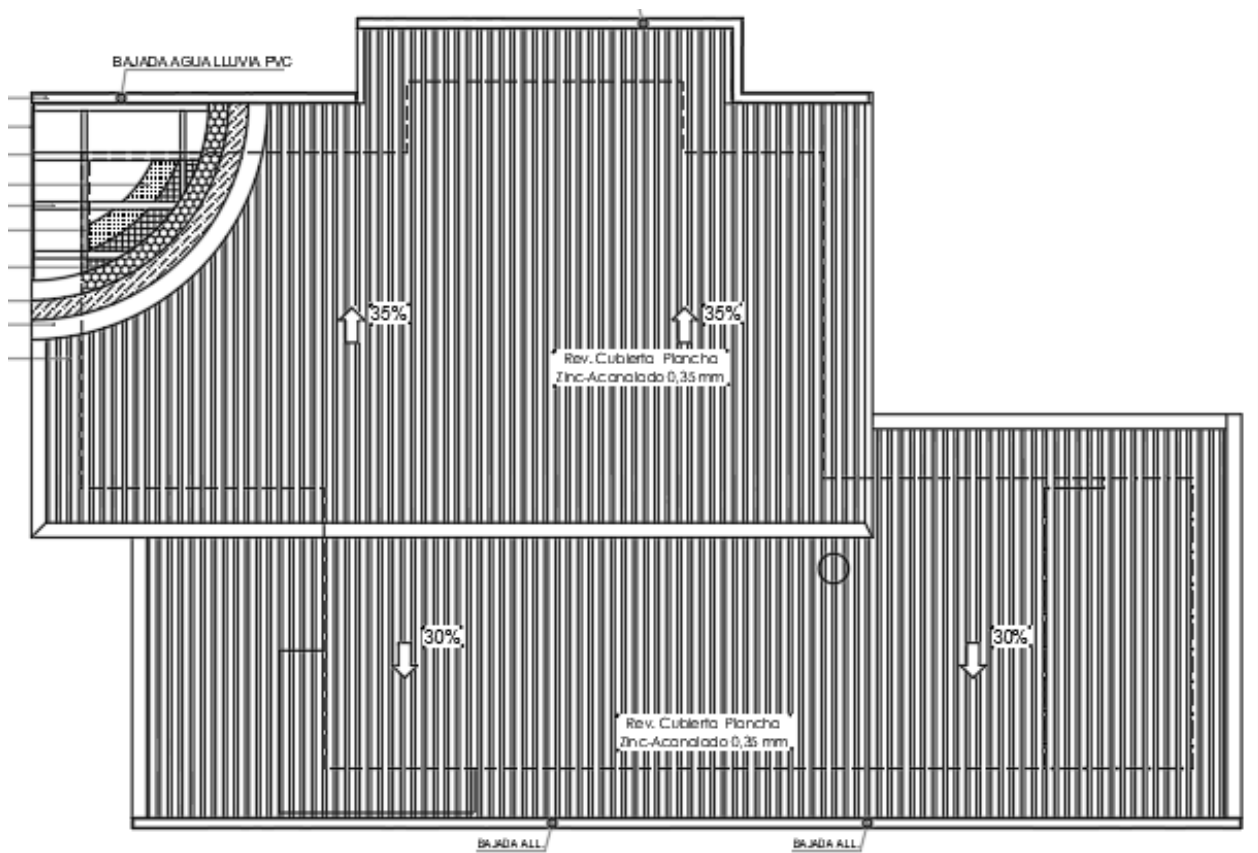


Figura 2.21: Vista de planta de vivienda social DS-10.

(Fuente: Diseño de en AutoCAD proveniente de SECPLAN de la ciudad de Chonchi, por el arquitecto Marco Marquez)

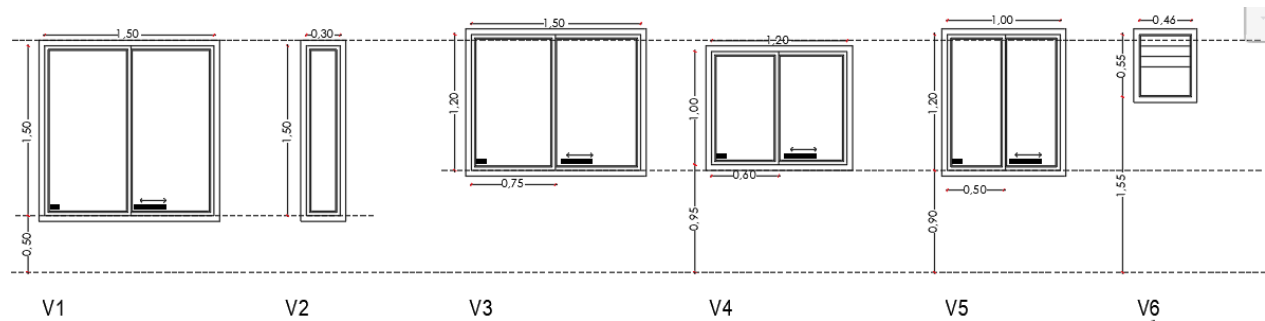


Figura 2.23: Ventanas de vivienda social DS-10.

(Fuente: Diseño de en AutoCAD proveniente de SECPLAN de la ciudad de Chonchi, por el arquitecto Marco Marquez)

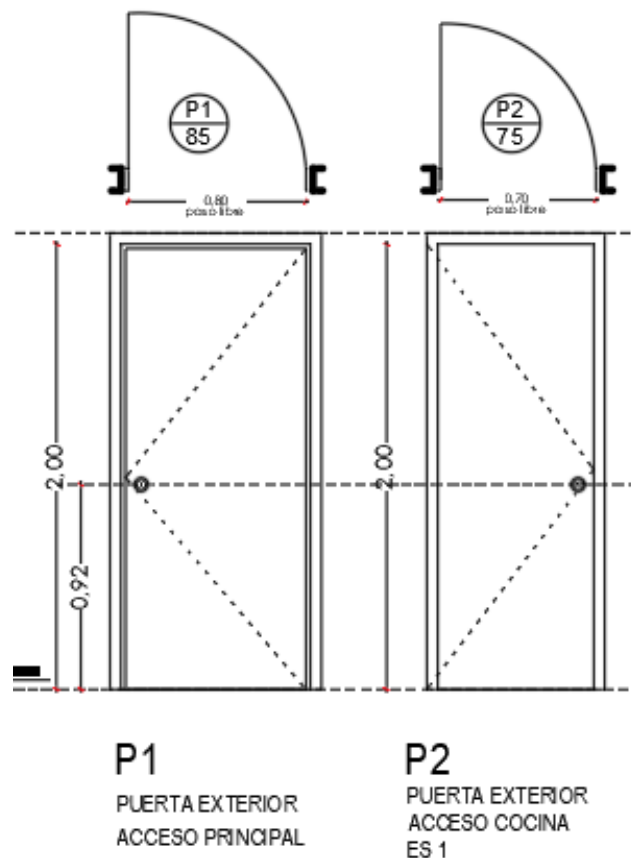


Figura 2.22: Puertas exteriores de vivienda social DS-10.

(Fuente: Diseño de en AutoCAD proveniente de SECPLAN de la ciudad de Chonchi, por el arquitecto Marco Marquez)

2.5. Reglamentación y Normativa Térmica de Viviendas

En el contexto general existen 3 intervalos de exigencias térmicas a evaluar en esta tesis. En primera instancia la O.G.U.C. del año 2000, posteriormente la O.G.U.C. del año 2007 y por último la resolución exenta 1636 del año 2019. Por lo que se puede hacer la generalización de que las viviendas que abarcan esos años cumplen con las exigencias correspondientes. En el Manual de Acondicionamiento Térmico (CCHC, 2015) expone el siguiente gráfico que da cuenta de las exigencias térmicas bajo las que fueron construidas las viviendas:

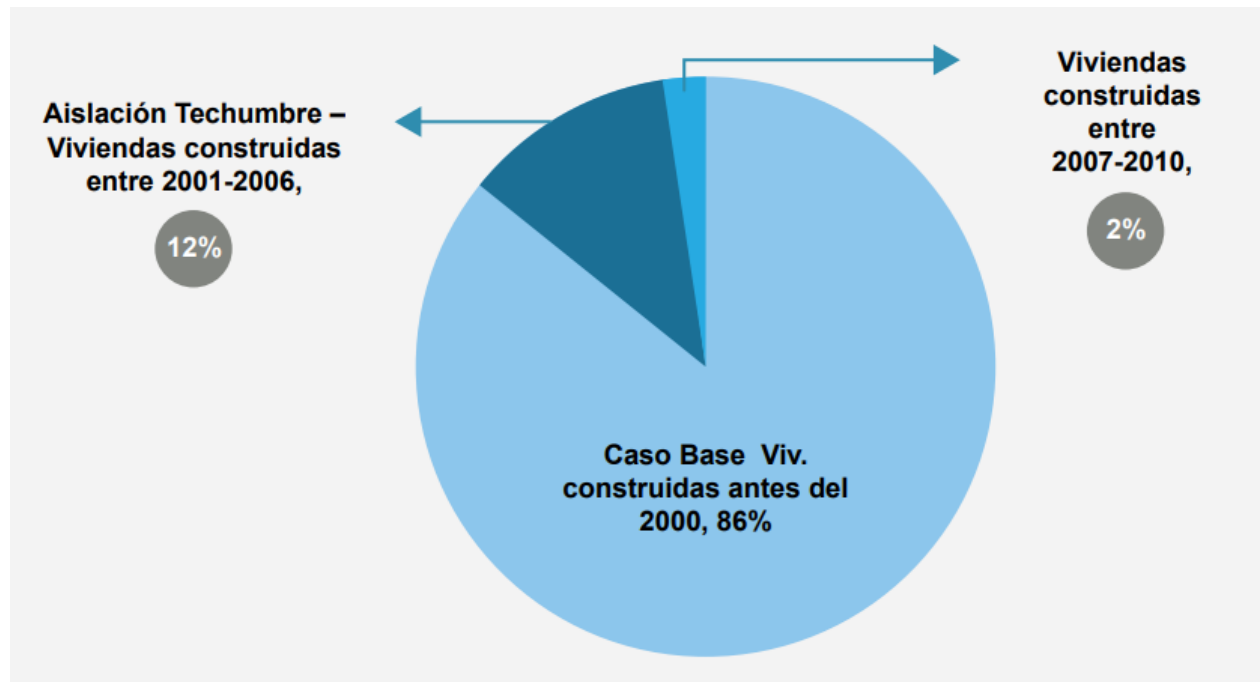


Figura 2.24: Distribución de viviendas en Chile según año de construcción.

(Fuente: Manual de acondicionamiento térmico.)

2.5.1. O.G.U.C. Artículo 4.1.10, año 2000 - 2007

En Chile se comienza a trabajar con la aplicación de estándares para la envolvente térmica, reglamentado por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (O.G.U.C.) a través del Artículo 4.1.10.

En el año 2000 la O.G.U.C. (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2000) se presentan las exigencias mínimas para la techumbre de las viviendas, esto con el foco de disminuir el consumo de energía de calefacción y mejorar el confort de los usuarios de las viviendas. Posteriormente el año 2007 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2007) se actualiza, e incorpora requerimientos para muros, ventanas y pisos ventilados. Por último, en la actualidad hay una propuesta de una Resolución (Vivienda y Urbanismo, 2019b) que presenta el complejo de puertas opacas y aumentos en los valores de aislación, principalmente en los muros y ventanas. A continuación se presentan las tablas de exigencias y su evolución:

Tabla 2.4: Exigencias para aislación térmica de viviendas, establecidas por la O.G.U.C. entre los años 2000 a 2007.

(Fuente: Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), año 2000.)

ZONAS	COMPLEJO DE TECHUMBRE	
	U	Rt
	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
1	0,84	1,19
2	0,60	1,66
3	0,47	2,13
4	0,38	2,60
5	0,33	3,07
6	0,28	3,54
7	0,25	3,57

2.5.2. O.G.U.C. Artículo 4.1.10, año 2007 - 2023

Tabla 2.5: Exigencias para aislación térmica de viviendas, establecidas por la O.G.U.C. entre los años 2007 a la actualidad.

(Fuente: Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), año 2007.)

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

Tabla 2.6: Exigencias para el vidriado en viviendas, establecidas por la O.G.U.C. entre los años 2007 a la actualidad.

(Fuente: Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), año 2007.)

ZONA	VENTANAS		
	% MÁXIMO DE SUPERFICIE VIDRIADA RESPECTO A PARAMETROS VERTICALES DE LA ENVOLVENTE		
	VIDRIO MONOLÍTICO (b)	DVH DOBLE VIDRIADO HERMÉTICO (c)	
		$3,6 \frac{W}{m^2 \cdot K} \geq U > 2,4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ (a)	$U \leq 2,4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
1	50 %	60 %	80 %
2	40 %	60 %	80 %
3	25 %	60 %	80 %
4	21 %	60 %	75 %
5	18 %	51 %	70 %
6	14 %	37 %	55 %
7	12 %	28 %	37 %

2.5.3. O.G.U.C. Artículo 4.1.10, año 2024

Tabla 2.7: Exigencias establecidas por la OGUC del año 2024.

(Fuente: O.G.U.C. 2024)

ZONA TÉRMICA	COMPLEJO DE TECHUMBRE		COMPLEJO DE MUROS		COMPLEJO DE PISO VENTILADO		COMPLEJO DE PUERTAS OPACAS	
	U	Rt	U	Rt	U	Rt	U	Rt
	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
A	0,84	1,19	2,10	0,48	3,60	0,28		
B	0,47	2,13	0,80	1,25	0,70	1,43	1,70	0,59
C	0,47	2,13	0,80	1,25	0,87	1,15	1,70	0,59
D	0,38	2,63	0,80	1,25	0,60	1,67	1,70	0,59
E	0,33	3,03	0,60	1,67	0,60	1,67	1,70	0,59
F	0,28	3,57	0,45	2,22	0,50	2,00	1,70	0,59
G	0,28	3,57	0,40	2,50	0,39	2,56	1,70	0,59
H	0,25	4,00	0,30	3,33	0,32	3,13	1,70	0,59
I	0,25	4,00	0,35	2,86	0,32	3,13	1,70	0,59

Tabla 2.8: Exigencias establecidas por la OGUC del año 2024.

(Fuente: O.G.U.C. 2024.)

ZONA TÉRMICA	ORIENTACIÓN	% MÁXIMO V/S TRANSMITANCIA TÉRMICA "U" DE LA VENTANA											
		≤ 0,6	≤ 0,8	≤ 1,2	≤ 1,6	≤ 2,0	≤ 2,4	≤ 2,8	≤ 3,2	≤ 3,6	≤ 4,0	≤ 4,4	≤ 5,8
A	Norte	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	98 %	97 %	95 %	94 %	91 %	88 %	50 %
	O-P	100 %	100 %	99 %	96 %	94 %	91 %	87 %	84 %	80 %	75 %	69 %	30 %
	Sur	94 %	93 %	91 %	89 %	85 %	82 %	78 %	74 %	69 %	63 %	57 %	25 %
	OGT	54 %	53 %	52 %	51 %	50 %	49 %	48 %	46 %	44 %	42 %	50 %	25 %
B	Norte	100 %	99 %	98 %	97 %	96 %	94 %	92 %	90 %	88 %	85 %	82 %	30 %
	O-P	92 %	91 %	89 %	87 %	84 %	81 %	78 %	75 %	71 %	66 %	60 %	20 %
	Sur	86 %	84 %	81 %	78 %	75 %	71 %	68 %	64 %	59 %	54 %	47 %	10 %
	OGT	52 %	51 %	49 %	47 %	46 %	45 %	43 %	42 %	40 %	38 %	35 %	10 %
C	Norte	96 %	95 %	94 %	93 %	91 %	90 %	88 %	85 %	83 %	79 %	75 %	40 %
	O-P	82 %	81 %	79 %	77 %	75 %	72 %	69 %	66 %	62 %	58 %	52 %	35 %
	Sur	75 %	73 %	70 %	67 %	64 %	61 %	58 %	54 %	49 %	44 %	38 %	15 %
	OGT	47 %	46 %	45 %	44 %	42 %	41 %	39 %	37 %	35 %	33 %	30 %	15 %
D	Norte	94 %	93 %	91 %	89 %	87 %	85 %	83 %	80 %	77 %	73 %	69 %	25 %
	O-P	73 %	72 %	70 %	68 %	65 %	63 %	60 %	57 %	53 %	49 %	44 %	15 %
	Sur	62 %	61 %	59 %	57 %	54 %	51 %	48 %	44 %	40 %	35 %	29 %	10 %
	OGT	43 %	42 %	41 %	40 %	38 %	37 %	35 %	33 %	31 %	28 %	25 %	10 %
E	Norte	90 %	89 %	87 %	85 %	83 %	80 %	78 %	75 %	71 %	67 %	61 %	10 %
	O-P	63 %	62 %	60 %	58 %	56 %	54 %	51 %	48 %	45 %	41 %	35 %	8 %
	Sur	51 %	50 %	48 %	46 %	44 %	41 %	38 %	35 %	31 %	26 %	20 %	5 %
	OGT	39 %	38 %	37 %	36 %	34 %	32 %	30 %	28 %	26 %	23 %	19 %	5 %
F	Norte	88 %	86 %	83 %	80 %	78 %	76 %	73 %	69 %	65 %	60 %	54 %	0 %
	O-P	54 %	53 %	51 %	49 %	47 %	45 %	42 %	40 %	36 %	32 %	27 %	0 %
	Sur	41 %	40 %	38 %	36 %	34 %	31 %	28 %	25 %	21 %	17 %	12 %	0 %
	OGT	36 %	35 %	33 %	31 %	30 %	28 %	26 %	24 %	21 %	17 %	13 %	0 %
G	Norte	84 %	82 %	79 %	76 %	74 %	71 %	67 %	64 %	59 %	54 %	46 %	0 %
	O-P	43 %	42 %	41 %	40 %	38 %	36 %	34 %	31 %	28 %	24 %	20 %	0 %
	Sur	31 %	30 %	28 %	26 %	24 %	21 %	19 %	16 %	13 %	8 %	0 %	0 %
	OGT	32 %	31 %	29 %	27 %	26 %	24 %	21 %	19 %	16 %	12 %	0 %	0 %
H	Norte	77 %	76 %	74 %	72 %	69 %	66 %	62 %	58 %	53 %	47 %	38 %	0 %
	O-P	34 %	33 %	32 %	31 %	29 %	27 %	25 %	23 %	20 %	16 %	12 %	0 %
	Sur	30 %	29 %	27 %	25 %	23 %	20 %	18 %	15 %	12 %	7 %	0 %	0 %
	OGT	31 %	30 %	28 %	26 %	25 %	23 %	20 %	18 %	15 %	11 %	0 %	0 %
I	Norte	75 %	73 %	70 %	67 %	64 %	61 %	57 %	52 %	46 %	39 %	30 %	0 %
	O-P	43 %	42 %	41 %	40 %	38 %	36 %	34 %	31 %	28 %	24 %	20 %	0 %
	Sur	28 %	27 %	25 %	23 %	21 %	18 %	16 %	13 %	10 %	5 %	0 %	0 %
	OGT	29 %	28 %	26 %	24 %	23 %	21 %	18 %	16 %	13 %	10 %	0 %	0 %

Tabla 2.9: Exigencias en cuanto a infiltraciones establecidas por la OGUC del año 2024.

(Fuente: O.G.U.C. 2024.)

Provincia	Clase de infiltración de aire
	50 Pa
	ach
Arica, Iquique, Tocopilla, Chañaral, Isla de Pascua	—
Parinacota, Tamarugal, El Loa, Coyahique, Aysén, General Carrera, Capitán Prat, Última Esperanza, Magallanes, Tierra del Fuego, Antártica Chilena	4,00
Copiapó, Limarí, Los Andes, Valparaíso, Santiago, Cordillera, Maipo, Melipilla, Talagante, Cachapoal, Cardenal Caro, Colchagua, Talca, Concepción, Arauco, Malleco, Cautín, Valdivia, Ranco, Osorno, Llanquihue, Palena, Chiloé	5,00
Antofagasta, Huasco, Elqui, Choapa, Petorca, Quillota, San Felipe de Aconcahua, San Antonio, Marga Marga, Chacabuco, Curicó, Linares, Cauquenes, Diguilín, Punilla, Itata, Biobío	8,00

2.5.4. NCh 853, año 2007

La NCh 853 (Normalización (INN), 2007) establece procedimientos para realizar cálculos de resistencias y transmitancias térmicas de cada uno de los elementos constructivos a trabajar, en específico se refiere a los de la envolvente térmica, incluyendo muros perimetrales, complejos de techumbres, pisos y cualquier elemento que separe ambientes a temperaturas distintas.

2.5.5. Zonas Térmicas

2.5.5.1. Actual Zonificación

Chile está dividido por el MINVU actualmente en 7 zonas térmicas, siendo establecidas por rangos de Grados Día. Entendiendo Grados Día como "En un período de un día, es la diferencia entre la temperatura fijada como "base", y la media diaria de las temperaturas bajo la temperatura base, igualando a la "base" aquellas superiores a ésta. Dependiendo del período utilizado, se puede hablar de grados/día grados/hora, grados/año, etc." (CCHC, 2015). A continuación, se presenta la tabla de grados/día con la que trabaja la O.G.U.C.

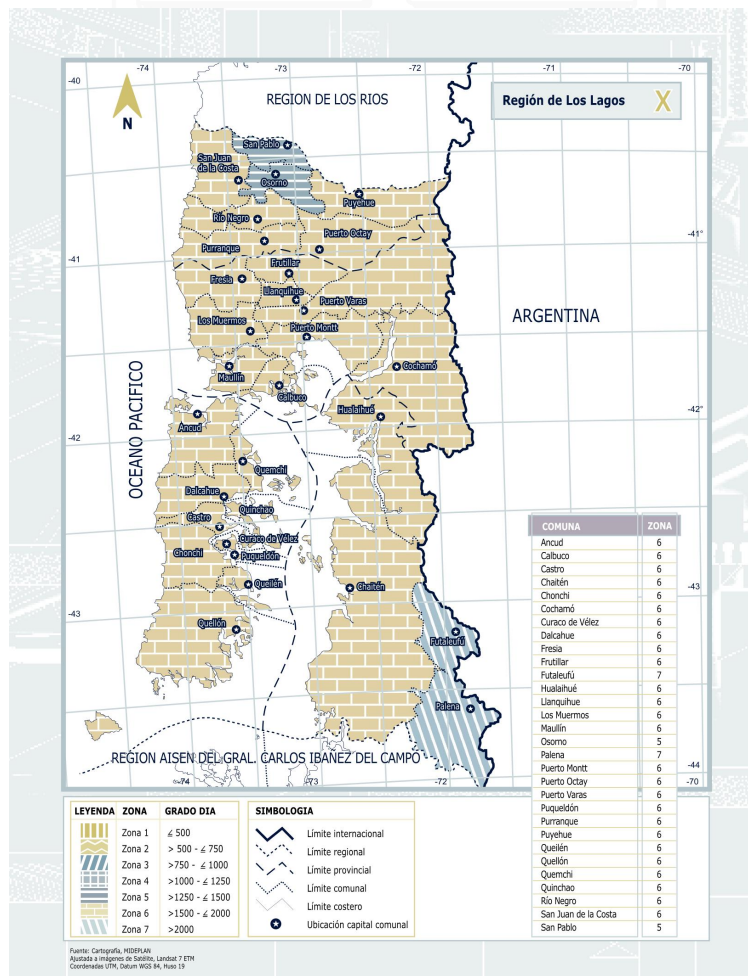


Figura 2.25: Zonas térmicas bajo las 7 tipologías, para la X región.

(Fuente: Manual de Aplicación Reglamentación Térmica.)

LEYENDA	ZONA	GRADO DÍA	SIMBOLOGIA
	Zona 1	≤ 500	Límite internacional
	Zona 2	$> 500 - \leq 750$	Límite regional
	Zona 3	$> 750 - \leq 1000$	Límite provincial
	Zona 4	$> 1000 - \leq 1250$	Límite comunal
	Zona 5	$> 1250 - \leq 1500$	Límite costero
	Zona 6	$> 1500 - \leq 2000$	Ciudades
	Zona 7	> 2000	

Figura 2.26: Leyenda para la lectura e interpretación del mapa de zonificación.
(Fuente: Manual de Aplicación Reglamentación Térmica.)

2.5.5.2. Nueva Zonificación

En la Resolución 1636 Exenta (Vivienda y Urbanismo, 2019b), del año 2019 se presenta una nueva zonificación térmica, donde se agregan más divisiones, con el objetivo de dar mayor representatividad a las exigencias para cada zona. A continuación se presenta el nuevo mapa de zonificación térmica.



Figura 2.27: Mapa de zonificación térmica para la Macrozona Sur, con categorías de la "A" a la "I".
(Fuente: Resolución Exenta 1636, año 2019)

2.6. Material Particulado 2,5

Se habla del material particulado 2,5 como foco específico entre agentes contaminantes, esto se debe a su origen y sus efectos en la salud. En primera instancia el material particulado 2,5 se refiere a una clasificación según su diámetro, siendo MP2,5 considerado como fino ya que sus partículas tienen un diámetro inferior a 2,5 micrones (Medio Ambiente, 2024). Este proviene de partículas combustibles, metales y componentes orgánicos entre otros. La información disponible del año 2019 indica que las emisiones de MP2,5 corresponden principalmente a la combustión a leña con un 65,86 % y el porcentaje de la distribución entre los emisores de MP2,5 tiene un aumento a medida que se avanza hacia el sur. (Ministerio del Medio Ambiente, 2023).

como indica la EPA "La mayor amenaza del humo proviene de las partículas finas, también llamadas material particulado o PM2,5. Estas partículas microscópicas pueden entrar en los ojos o sistema respiratorio, y provocar ardor en los ojos, goteo nasal, y enfermedades, como bronquitis. Las partículas finas pueden empeorar los síntomas del asma y desencadenar ataques de asma. Las partículas finas también pueden desencadenar infartos de miocardio, ritmo cardíaco irregular e insuficiencia cardíaca, en especial en personas que ya están en riesgo por estas enfermedades." (Protección Ambiental de Estados Unidos, 2023).

Hoy en día el Ministerio del Medio Ambiente de Chile, presenta Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica (PPDA) (Ministerio del Medio Ambiente, 2024b), siendo los PPDA herramientas diseñadas para reducir los niveles de contaminación del aire con el fin de proteger la salud pública. Hay dos tipos de planes, los Planes de Prevención Atmosférica (PPA) y los Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA), siendo estos últimos los que se encargan de recuperar los niveles de calidad ambiental en zonas saturadas. En la actualidad la comuna de Castro y ninguna comuna de la provincia de Chiloé presenta un PDA.

2.7. Herramientas Computacionales

2.7.1. ¿Qué es una herramienta computacional?

Una herramienta computacional o informática corresponde a un conjunto de programas, aplicaciones o, simplemente instrucciones, que al utilizarlas permitirán al usuario realizar un trabajo determinado de la mejor manera posible en algún dispositivo informático (Euroinnova, 2024).

Dentro de sus principales funciones se encuentran:

1. Facilitar el trabajo de personas a la hora de realizar alguna labor.
2. Permiten llevar el control de procesos.
3. Se utilizan para la creación de nuevos proyectos, ya sea en la mejora o en la innovación.
4. Existen herramientas computacionales avanzadas que permiten sustituir el trabajo de personas.
5. Manejo y procesamiento de una gran cantidad de datos.

2.7.2. EnergyPlus y OpenStudio

2.7.2.1. ¿Qué es EnergyPlus?

Como indica en su página "EnergyPlus™ es un programa de simulación energética de edificios completos que ingenieros, arquitectos e investigadores utilizan para modelar tanto el consumo de energía (para calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación y cargas de enchufes y procesos) como el uso de agua en los edificios." (EnergyPlus, 2024).



Figura 2.28: Logo de EnergyPlus.
(Fuente: Página oficial de EnergyPlus)

2.7.2.2. ¿Qué es OpenStudio?

En la página web indica como descripción principal "OpenStudio ® es una colección de herramientas de software multiplataforma (Windows, Mac y Linux) para respaldar el modelado energético de todo el edificio mediante EnergyPlus y el análisis avanzado de la luz natural mediante Radiance. OpenStudio es un proyecto de código abierto para facilitar el desarrollo comunitario, la extensión y la adopción del sector privado." (OpenStudio, [2024](#)).



Figura 2.29: Logo de EnergyPlus.
(Fuente: Página oficial de OpenStudio)

2.8. Metodología

A continuación se presenta en la Figura 2.30 el diagrama de flujo del proceso de trabajo para el desarrollo de la presente tesis.

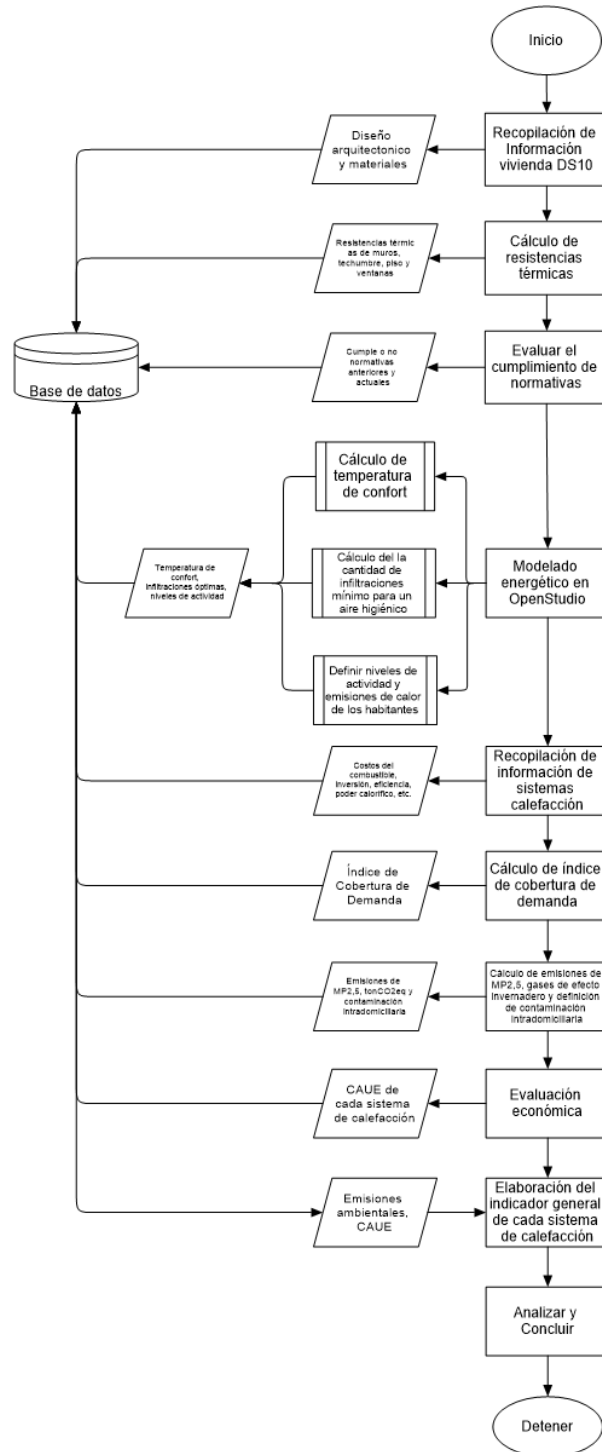


Figura 2.30: Diagrama de flujo del trabajo realizado.
(Fuente: Creación propia)

Este capítulo describe la metodología empleada para realizar la evaluación económica y de emisiones de los diferentes sistemas de calefacción en una vivienda tipo DS-10 ubicada en Chiloé. Se detallan los procedimientos utilizados para la recopilación de datos, el análisis de costos, y la evaluación de emisiones contaminantes.

2.8.1. Recopilación de Información del Diseño de Vivienda

La vivienda tipo DS-10 es una vivienda unifamiliar típica de la región de Chiloé, con una superficie de 53 m^2 y construida con materiales convencionales. Desde el documento de diseño arquitectónico y detalles de la vivienda se obtienen los materiales y dimensiones de muros, techumbre, pisos, ventanas y puertas. Posteriormente se obtienen las características de los materiales como su rugosidad, espesor en [m], conductividad $[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}]$, densidad $[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}]$ y calor específico $[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}]$

2.8.2. Catastro de Construcción de Viviendas

Se realiza el catastro de las viviendas construidas en la comuna de Castro, agrupadas según sus fechas de construcción y asumiendo el supuesto de que las viviendas cumplen las normativas de las fechas correspondientes y considerando que se implementa por primera vez en el año 2000 y luego se actualiza el año 2007, implicaría que hoy en día hay un 43,3 % como se indica en la Tabla 2.10 de viviendas que cumplen los estándares de construcción.

Tabla 2.10: Cantidad de viviendas construidas en Castro, agrupadas según el intervalo de fechas donde se crearon las normativas de construcción (año 2000) y su actualización (año 2007).

(Fuente: Creación propia.)

Fechas de Construcción	Cantidad de Viviendas Construidas	Porcentaje
1723 - 1999	8322	41,6 %
2000 - 2006	3011	15,1 %
2007-2023	8660	43,3 %

2.8.3. Cálculo de Resistencias Térmicas y Evaluación del Cumplimiento de la Normativa

Se calcula la resistencias térmicas de muros, pisos y techumbre del caso base. Mediante las indicaciones de la NCh853 (Normalización (INN), 2007), donde se presentan las siguientes ecuaciones:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (2.12)$$

Donde e corresponde al espesor, λ la conductividad térmica y R la resistencia térmica de una capa material. Para obtener la resistencia térmica total de un elemento compuesto, se indica de la siguiente forma:

$$R_T = \frac{1}{U} \quad (2.13)$$

También se considera de suma relevancia la siguiente tabla que presenta la NCh853 (*ibíd.*).

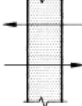
Resistencias térmicas de superficie en $m^2 \times K/W$							
Posición del elemento y sentido del flujo de calor		Situación del elemento					
		De separación con espacio exterior o local abierto			De separación con otro local, desván o cámara de aire		
		R_{si}	R_{se}	$R_{si} + R_{se}$	R_{si}	R_{se}	$R_{si} + R_{se}$
Flujo horizontal en elementos verticales o con pendiente mayor que 60° respecto a la horizontal		0,12	0,05	0,17	0,12	0,12	0,24
Flujo ascendente en elementos horizontales o con pendiente menor o igual que 60° respecto a la horizontal		0,09	0,05	0,14	0,10	0,10	0,20
Flujo descendente en elementos horizontales o con pendiente menor o igual que 60° respecto a la horizontal		0,17	0,05	0,22	0,17	0,17	0,34
NOTAS 1) Estos valores se han obtenido experimentalmente por el método de NCh851. 2) Los valores de esta tabla corresponden a velocidades del viento en el exterior menores que 10 km/h. Para velocidades superiores se debe considerar $R_{se} = 0$. 3) Bajo condiciones de pérdidas térmicas por parte del local (invierno), en general, el flujo de calor es ascendente a través de techumbres y descendente a través de los pisos. 4) Bajo condiciones de ganancias térmicas por parte del local (verano), en general, el flujo de calor es ascendente a través de los pisos y descendente a través de las techumbres.							

Figura 2.31: Resistencias térmicas de superficie.
(Fuente: NCh853)

Para la vivienda social DS-10 se evalúan diversas soluciones constructivas y cantidades de renovaciones de aire por hora, cada variación de forma individual para evaluar su impacto, como de forma combinada para observar el comportamiento en conjunto. A continuación se presentan las variaciones realizadas:

- **Doble capa de aislación térmica en la techumbre:** Se evalúa la situación donde se utiliza una doble capa del material lana de vidrio en la techumbre de la vivienda, donde cada capa tiene una densidad de $30 \frac{kg}{m^3}$ y 120 mm de espesor.
- **Doble capa de aislación térmica en los muros:** Se evalúa la situación donde se utiliza una doble capa del material lana de vidrio en los muros exteriores, donde cada capa tiene una densidad de $14 \frac{kg}{m^3}$ y 50 mm de espesor.
- **Doble capa de aislación térmica en el piso:** Se evalúa la situación donde se utiliza una doble capa del material lana de vidrio en el piso de la vivienda, donde cada capa es de $R100 = 188$ y 80 mm de espesor.
- **Doble vidriado hermético:** Se pasa del caso base de vidrio monolítico a un doble vidriado hermético de espesores 3/4/3 y 6/12/6.
- **Variación en la cantidad de renovaciones de aire por hora:** Se varía la cantidad de renovaciones de aire por hora desde 4 (mínimo higiénico calculado) a 28 con aumentos de 4 (pasando por 24 renovaciones de aire por hora, que es lo común en Chile).

Estas modificaciones se realizan de forma individual y posteriormente se realizan combinaciones que se presentan en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11: Soluciones constructivas y variaciones de renovaciones de aire por hora evaluadas en las simulaciones.

(Fuente: Creación propia.)

Caso	Descripción
Base	No tiene modificaciones y se consideran 4 renovaciones de aire por hora
DVH 6/12/6	Se utiliza en todas las ventanas el doble vidriado hermético 6/12/6
DVH 3/4/3	Se utiliza en todas las ventanas el doble vidriado hermético 3/4/3
8 Renovaciones de aire	Se aumenta el caso base a 8 renovaciones de aire por hora
12 Renovaciones de aire	Se aumenta el caso base a 12 renovaciones de aire por hora
16 Renovaciones de aire	Se aumenta el caso base a 16 renovaciones de aire por hora
20 Renovaciones de aire	Se aumenta el caso base a 20 renovaciones de aire por hora
24 Renovaciones de aire	Se aumenta el caso base a 24 renovaciones de aire por hora
28 Renovaciones de aire	Se aumenta el caso base a 28 renovaciones de aire por hora
Doble Capa Aislación Muros	Se aplica una segunda capa de aislamiento térmica a todos los muros exteriores.
Doble Capa Aislación Techumbre	Se aplica una segunda capa de aislamiento térmica a la techumbre
Doble Capa Aislación piso	Se aplica una segunda capa de aislamiento térmica al piso
DVH 3/4/3 + 8 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y una variación a 8 renovaciones de aire por hora
DVH 3/4/3 + 12 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y una variación a 12 renovaciones de aire por hora
DVH 3/4/3 + 16 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y una variación a 16 renovaciones de aire por hora
DVH 3/4/3 + 20 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y una variación a 20 renovaciones de aire por hora
DVH 3/4/3 + 24 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y una variación a 24 renovaciones de aire por hora
DVH 3/4/3 + 28 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y una variación a 28 renovaciones de aire por hora
DVH 3/4/3 + D.C.A. Muro	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento térmica en los muros
DVH 3/4/3 + D.C.A. Techumbre	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento térmica en los techumbre
DVH 3/4/3 + D.C.A. Piso	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento térmica en los piso
DVH 6/12/6 + 8 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y 8 renovaciones de aire por hora
DVH 6/12/6 + 12 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y 12 renovaciones de aire por hora
DVH 6/12/6 + 16 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y 16 renovaciones de aire por hora
DVH 6/12/6 + 20 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y 20 renovaciones de aire por hora
DVH 6/12/6 + 24 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y 24 renovaciones de aire por hora
DVH 6/12/6 + 28 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y 28 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Muros + Techumbre + DVH 3/4/3	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en muros y techumbre
D.C.A. Muros + Piso + DVH 3/4/3	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en muros y piso
D.C.A. Techumbre + Piso + DVH 3/4/3	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en techumbre y piso
D.C.A. Muros + Techumbre + DVH 3/4/3 + 8 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en muros y techumbre más 8 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Muros + Piso + DVH 3/4/3 + 8 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en muros y piso más 8 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Techumbre + Piso + DVH 3/4/3 + 8 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en techumbre y piso más 8 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Muros + Techumbre + DVH 3/4/3 + 12 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en muros y techumbre más 12 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Muros + Piso + DVH 3/4/3 + 12 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en muros y piso más 12 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Techumbre + Piso + DVH 3/4/3 + 12 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en techumbre y piso más 12 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Muros + Techumbre + DVH 3/4/3 + 16 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en muros y techumbre más 16 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Muros + Piso + DVH 3/4/3 + 16 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en muros y piso más 16 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Techumbre + Piso + DVH 3/4/3 + 16 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en techumbre y piso 16 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Muros + Techumbre + DVH 3/4/3 + 20 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en muros y techumbre más 20 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Muros + Piso + DVH 3/4/3 + 20 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en muros y piso más 20 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Techumbre + Piso + DVH 3/4/3 + 20 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en techumbre y piso más 20 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Muros + Techumbre + DVH 3/4/3 + 24 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en muros y techumbre más 24 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Muros + Piso + DVH 3/4/3 + 24 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en muros y piso más 24 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Techumbre + Piso + DVH 3/4/3 + 24 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en techumbre y piso más 24 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Muros + Techumbre + DVH 3/4/3 + 28 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en muros y techumbre más 28 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Muros + Piso + DVH 3/4/3 + 28 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en muros y piso más 28 renovaciones de aire por hora
D.C.A. Techumbre + Piso + DVH 3/4/3 + 28 Renov	Se aplica doble vidriado hermético y doble capa de aislamiento en techumbre y piso más 28 renovaciones de aire por hora

2.8.4. Modelado en OpenStudio con el Motor de EnergyPlus

Como síntesis del flujo de trabajo realizado en OpenStudio se presenta la Figura 2.32, donde queda plasmado a modo general cada sección del trabajo en con el software.

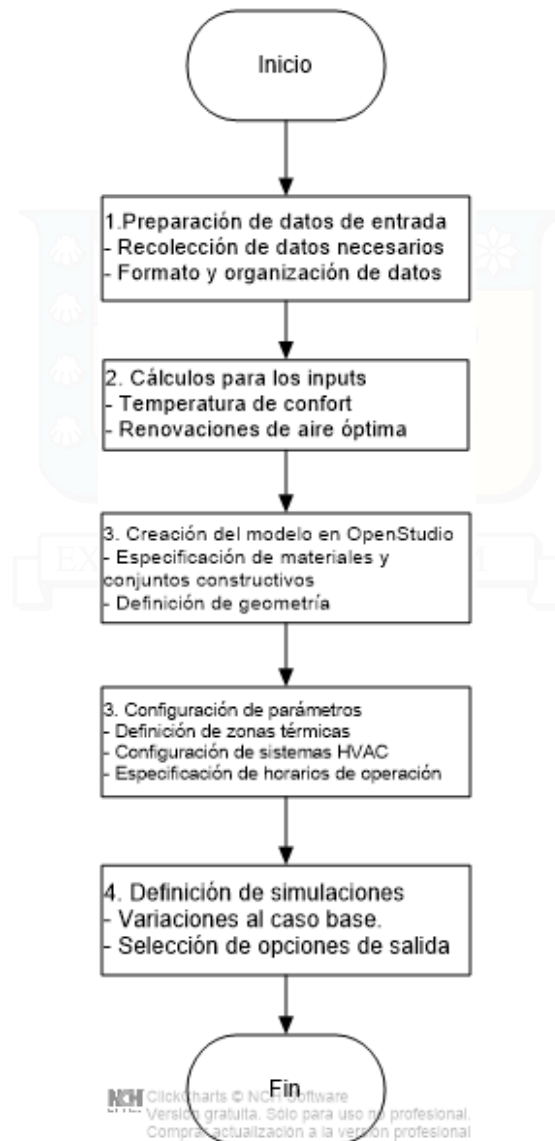


Figura 2.32: Diagrama de flujo del trabajo en OpenStudio.
(Fuente: Creación propia)

Para el modelado de la vivienda, se utilizan los software OpenStudio para lo cual se ingresan los siguientes input:

1. Se ingresa el archivo climático .epw de la zona de Castro, dando un contexto climático.
2. Posteriormente se define una temperatura de confort mediante el método Simplificado de Confort Adaptativo de la ASHRAE que se expone en (Vivienda y Urbanismo, 2019a). Con la ecuación.

$$T_n^{\circ}C = 17,8 + 0,31 * T_m \quad (2.14)$$

Se realiza el cálculo para cada mes del año y se define en una Schedule de temperatura.

3. Definir una Schedule con el uso de la vivienda, donde se indica horas de ocupación.
4. Definir una Schedule la actividad de los usuarios, donde se muestran en un indicador de energía las actividades realizadas al interior de la vivienda. Las equivalencias de energía emitida según la actividad se obtiene en el

manual de inputoutputReference (OpenStudio, 2023).

- Definir la cantidad de infiltraciones óptima para la vivienda, esto se realiza con la tabla entregada por el Manual de Diseño para Soluciones en Edificaciones (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2022).

Tabla 2.d

Renovaciones de aire por hora para diferentes lugares

Lugar	n
Baño público	60
Gimnasio	10
Dormitorio	0,5 – 1
Living	3 – 5
Comedor	3 – 5
Cocina	5 – 10
Baño casa	5 – 15

Figura 2.33: Renovaciones de aire por lugar.
(Fuente: Manual de Diseño para Soluciones en Edificaciones)

Con la tabla anterior se realiza la transformación de N° de renovaciones por hora a volumen que hay que renovar por hora mediante la siguiente ecuación:

$$Vh_{total} = \sum V_i * n_i \quad (2.15)$$

Donde Vh_{total} es el volumen total que se debe renovar para tener un aire higiénico, V_i es el volumen del lugar i de la vivienda y n_i es la cantidad de renovaciones por hora que requiere el lugar i de la vivienda. Posteriormente se obtiene la cantidad de renovaciones por hora totales requeridas para obtener un aire higiénico en la vivienda, mediante la ecuación:

$$R_{totales} = \frac{Vh_{total}}{V_{vivienda}} \quad (2.16)$$

Donde $V_{vivienda}$ corresponde al volumen de la vivienda.

- Se define el diseño de la vivienda con sus dimensiones correspondientes, ubicación de ventanas y puertas exteriores, trabajando con una única zona térmica interior y posteriormente se define la orientación.

2.8.4.1. Temperatura de Confort

Se utiliza el método simplificado de confort adaptativo para el cálculo de la temperatura de confort, presentando las temperaturas de la Tabla 2.12 correspondientes a los requerimientos de la comuna de Castro o zona térmica 6 o G según corresponda a la normativa.

Tabla 2.12: Temperatura de confort calculada mediante el método simplificado de confort adaptativo.

(Fuente: Creación propia.)

Mes	Temperatura Promedio [C°]	Método Simplificado de Confort Adaptativo [C°]
Enero	15	22,5
Febrero	15	22,5
Marzo	13	21,8
Abril	11	21,2
Mayo	9	20,9
Junio	8	20,9
Julio	7	20,9
Agosto	8	20,9
Septiembre	8	20,9
Octubre	10	21,5
Noviembre	11	21,7
Diciembre	13	22,2

2.8.4.2. Cantidad de Infiltraciones

Se realiza el cálculo de la cantidad óptima de renovaciones de aire para la vivienda social DS-10, en este valor se encuentra la cantidad mínima de renovaciones posibles para que la vivienda tenga un aire higiénico durante las 24 horas del día. Como resultado se obtienen que la vivienda posee 221,2 m^3 totales y la cantidad de renovaciones de aire por hora que requiere es de 787,8 m^3 , obteniendo una cantidad óptima de 4 renovaciones de aire por hora como se presenta en la Tabla 2.14.

Tabla 2.13: Volumen de las zonas de la vivienda DS-10 y volumen requerido de recambio.

(Fuente: Creación propia.)

Dimensionamiento Vivienda DS-10		
Zona	Volumen Estimado [m^3]	Volumen Requerido de Recambio [m^3]
Dormitorio 1	38,7	31,0
Dormitorio 2	33,7	26,9
Pasillo	15,8	7,9
Baño	12,6	125,6
Comedor	44,5	178,0
Living	37,9	151,6
Cocina	38,1	266,7
Total	221,2	787,8

Tabla 2.14: Cantidad óptima de renovaciones de aire para la vivienda DS-10.

(Fuente: Creación propia.)

Volumen Requerido de Recambio [m^3]	787,8
Volumen de la Vivienda DS-10 [m^3]	221,2
Cantidad Óptima de Renovaciones	4

2.8.5. Sistemas de Calefacción Evaluados

De cada sistema de calefacción se realiza el análisis de costo de inversión y operación, como también se evalúan las emisiones de material particulado 2,5, emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación intradomiciliaria. Para lo anterior es de suma relevancia tener en cuenta las características de los equipos, como su eficiencia, combustible que utilizan, etc. Los sistemas de calefacción evaluados se presentan en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15: Sistemas de calefacción evaluados y características principales.
(Fuente: Excel de Ministerio de Energía.)

Equipo	Costo Promedio [CLP]	Eficiencia Promedio [%]	Equipo Modulante
Aire Acondicionado Split Inverter	\$379.990	280 %	Si
Estufa a Parafina	\$549.990	85 %	No
Estufa de Pellet	\$844.990	85 %	Si
Oleoeléctrico	\$159.980	100 %	Si
Estufa Gas Licuado	\$149.990	65 %	No
Estufa a Leña	\$469.990	70 %	No

2.8.6. Cálculo de Costos Operación e Índice de Cobertura de Demanda

La demanda de potencia estimada para la vivienda en un mes se calcula mediante la Ecuación 2.17, que se presenta a continuación:

$$Potencia\ Estimada\ de\ la\ Demanda = \frac{Demanda\ Max * 1000}{Dias\ Mes * Hrs\ Dia} \quad (2.17)$$

La *Potencia Estimada de la Demanda* se refiere a la cantidad de watts necesarios para que la vivienda alcance su temperatura de confort. La *Demanda Max* es la demanda máxima posible en kWh para el mes de mayor consumo, que en el caso de la comuna de Castro ocurre en junio, como se observa en la Figura 2.34. Se elige el mes de mayor consumo porque, al cubrir el "peor" caso, se asume que se cubrirá la demanda para el resto del año. Además, se consideran los *Dias Mes*, que corresponden al número de días del mes evaluado, y las *Hrs Dia*, que representan la cantidad de horas en un día.

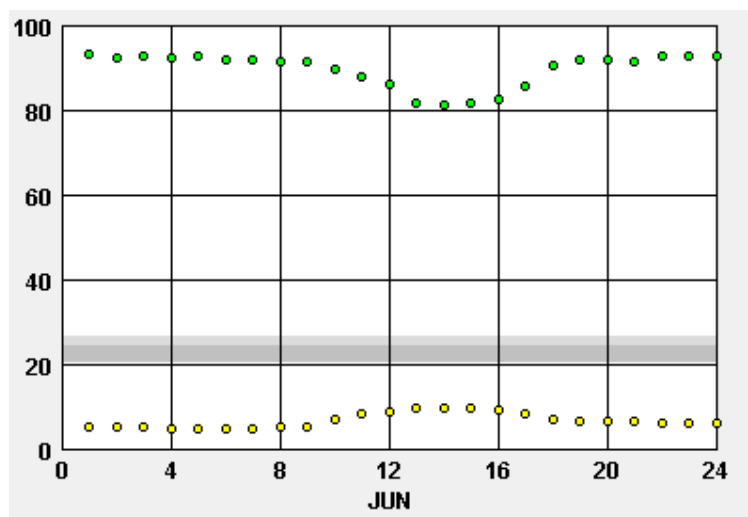


Figura 2.34: Comportamiento de la temperatura de bulbo seco y humedad relativa en el mes de junio.
(Fuente: Climate consultant 6.0)

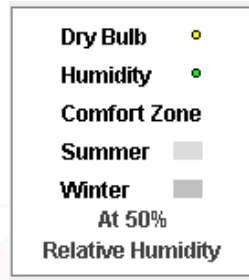


Figura 2.35: Leyenda gráfico de la temperatura de bulbo seco y humedad relativa en el mes de junio.
(Fuente: Climate Consultant 6.0)

El cálculo de la cantidad de equipos se obtiene mediante la ecuación Ecuación 2.18, la cual si da un valor de 0 implica que requiere un equipo, en caso contrario se redondea al valor mayor, de esta forma se cubre toda la demanda.

$$Cantidad\ de\ Equipos = \frac{Potencia\ Estimada\ de\ la\ Demanda}{Potencia\ del\ Equipo * Eficiencia\ del\ Equipo} \quad (2.18)$$

Donde *Cantidad de Equipos* corresponde a la cantidad de equipos necesarios para cubrir la demanda energética de calefacción en un mes donde

Se calcula el Índice de Cobertura de la Demanda (ICD).

$$ICD_{i,h,k} = \frac{Oferta\ Energetica_{i,k}}{Demanda\ Promedio_h} \quad (2.19)$$

Donde el sub índice *i* corresponde al equipo de calefacción que se está evaluando, *h* es el mes que se selecciona para evaluar y por último *k* que son las horas de uso en un día del equipo a evaluar. Por otro lado, tenemos la *Oferta Energetica_{i,k}* que corresponde a la Oferta energética que presenta un equipo *i* en una cantidad de horas *k* de uso. También la *Demanda Promedio_h* que corresponde a la demanda energética de la vivienda para lograr la temperatura de confort.

$$Demanda\ Promedio_h = Demanda\ Total\ Anual * Proporción\ Mensual_h \quad (2.20)$$

Donde *Demanda Total Anual* corresponde a la demanda energética en un año que requiere la vivienda simulada para lograr la temperatura de confort. El otro punto la *Proporción Mensual_h* que corresponde a el porcentaje de la demanda energética anual que es para cierto mes *h*.

$$Oferta\ Energetica_{i,h,k} = \frac{Hrs\ De\ Uso_k * Dias\ Mes_h * Cantidad\ De\ Equipos_i * Potencia\ Equipo_i * Rendimiento_i}{1000} \quad (2.21)$$

Donde *Hrs De Uso_k* corresponde a las horas *k* de uso de un sistema de calefacción que esta siendo evaluado, *Dias Mes_h* es la cantidad de días que hay en el mes *h* evaluado, *Cantidad De Equipos_i* La cantidad de un mismo sistema de calefacción que se evalúa para satisfacer la demanda energética, *Potencia Equipo_i* es la potencia del equipo evaluado y por ultimo *Rendimiento_i* es el rendimiento que tiene este sistema de calefacción.

Por otro lado, los costos de Horas de operación se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$Costo\ de\ Uso_{i,h,k} = Oferta\ Energetica_{i,h,k} * Costo\ Combustible_i \quad (2.22)$$

Donde el *Costo Combustible_i* corresponde al costo del combustible que utiliza el sistema de calefacción *i* evaluado.

2.8.7. Cálculo de Emisiones de MP 2,5

Según indica Fernando Alborno (Alborno Montenegro, 2022) en su memoria, los calefactores que utilizan combustibles fósiles o biomasa, emiten directamente $MP_{2,5}$. Por otro lado, los calefactores que utilizan electricidad no generan la emisión del material particulado 2,5 de forma directa, sin embargo si existen emisiones indirectas en su proceso, ya sea por la generación de electricidad o el transporte del combustible que genera esta. A continuación, se presenta la ecuación de cálculo de toneladas anuales de $MP_{2,5}$ emitidas por cada hogar h cuando utiliza el calefactor a leña tipo i' :

$$EMP_{2,5,p,i'} = \frac{C_p * (FELS_{i'} * LS + FELS_{H_{i'}} * LSH + FELH_{i'} * LH)}{10E+06} \quad (2.23)$$

Donde C_p es el consumo de leña en el hogar p en $[\frac{kg}{año}]$. $FELS_{i'}$ es el factor de emisión de $MP_{2,5}$ del calefactor a leña tipo i' para leña seca y LS la proporción de leña seca utilizada para calefacción. Después $FELS_{H_{i'}}$ es el factor de emisión de $MP_{2,5}$ del calefactor a leña tipo i' para leña semi húmeda y LSH la proporción de semi húmeda utilizada para calefacción. Por último, $FELH_{i'}$ es el factor de emisión de $MP_{2,5}$ del calefactor a leña tipo i' para leña húmeda y LSH la proporción de húmeda utilizada para calefacción.

Posteriormente, la cantidad de $MP_{2,5}$ emitida en $[\frac{ton}{año}]$ por cada hogar ($EMP_{2,5,h,i}$) al evaluar otro sistema de calefacción como recambio del calefactor a leña tipo i' por un calefactor i se puede estimar a través de la siguiente ecuación:

$$EMP_{2,5,p,i} = \frac{Ceq_{p,i} * FE_i}{10E+06} \quad (2.24)$$

Donde $Ceq_{p,i}$ representa el consumo equivalente de la opción de calefacción evaluada distinta al sistema de calefacción a leña, luego FE_i representa el factor de emisión de $MP_{2,5}$ para la opción de calefacción i .

La cantidad de emisiones de la calefacción a leña varía según la humedad que contenga la leña. La Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT, 2015) entregó la información sobre los niveles de humedad de la leña utilizada para calefacción en la zona centro-sur de Chile, donde se indica que un 27 % es leña seca (<20 % de humedad), 43 % es semihúmeda (20 %-30 % de humedad) y 30 % es húmeda (>30 % humedad). Se utilizan los valores anteriores como los porcentajes de consumos de leña de cada tipo.

Tabla 2.16: Factores de emisión de MP 2,5 según combustible.

(Fuente: (Mardones, 2021).)

Calefactores	Factor de emisión		
	2,4 (g/kg de leña seca)	10,7 (g/kg de leña semihúmeda)	10,7 (g/kg de leña húmeda)
Electricidad	0,000000034 (g/kWh)		
Parafina	0,0000336 (g/l)		
Pellet	1,8 (g/kg)		
Gas Licuado	0,000091968 (g/kg)		

2.8.8. Cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Según se indica en la tesis de Alborno (Alborno Montenegro, 2022), la ecuación para el cálculo de las emisiones de CO_2 , N_2 y CH_4 viene dada por la siguiente expresión:

$$ECO_{2eq,h,i'} = \sum Ceq_{h,i} * FE_{p,i} * GWP_p \quad (2.25)$$

Donde el conjunto de las emisiones queda representado por las toneladas de CO_2 equivalente (ECO_{2eq}), mediante el Potencial de Calentamiento Global (GWP) de cada contaminante. A continuación se presenta la siguiente tabla con los factores de emisión utilizados:

Tabla 2.17: Factores de emisión de gases efecto invernadero según combustible y valor del GWP.

(Fuente: (GHG Protocol, 2024), (Ozgen y Caserini, 2018), (Gómez et al., 2006), (U.S. Environmental Protection Agency, 2018), (Seljeskog, Goile y Skreiberg, 2017) e (IPCC, 2021).)

Combustible	Factor de emisión CO ₂	Factor de emisión de CH ₄	Factor de emisión de N ₂ O
Leña	0	0,0000047 (ton CH ₄ /kg)	0,0000000113 (ton N ₂ O/MJ)
Pellet	0	0,00000001 (ton CH ₄ /MJ)	0,000000032 (ton N ₂ O/kg)
GLP	0,002984 (ton CO ₂ /kg)	0,00000024 (ton CH ₄ /kg)	0,0000000021 (ton N ₂ O/MJ)
Parafina	0,003149 (ton CO ₂ /l)	0,00000043 (ton CH ₄ /l)	0,0000000016 (ton N ₂ O/MJ)
Electricidad	0,000378 (ton CO ₂ /kWh)	0,00000005 (ton CH ₄ /kWh)	0,00000000816 (ton N ₂ O/kWh)
GWP	1	29,8	273

Para la conversión de aquellos factores de emisión que en sus unidades se encuentran expresados en $\frac{ton}{MJ}$ se utilizan valores de conversión de unidades de masa a unidades de energía, lo que vendría siendo la densidad energética, para lo cual tenemos los siguientes valores: para la leña $18 [\frac{MJ}{kg}]$ (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2012), pellet $17,4 [\frac{MJ}{kg}]$ (Telmo, 2011), GLP $46,1 [\frac{MJ}{kg}]$ (Reyes et al., 2015) y parafina $44,5 [\frac{MJ}{kg}]$ (ibíd.).

2.8.9. Emisiones Intradomiciliarias

Para la evaluación de las emisiones intradomiciliarias se trabaja de forma cualitativa, entregando clasificaciones según la tecnología de calefacción que utiliza, presentando las siguientes clasificaciones:

- **Sin Contaminación:** Equipos de calefacción que utilizan únicamente Electricidad.
- **Contaminación Moderada:** Pellet, calderas a gas u otras tecnologías a combustión con tubos de escape al exterior.
- **Contaminación Alta:** Estufas de llama abierta interior gas, parafina o leña.

2.8.10. Evaluación Económica de los Sistemas de Calefacción

Para realizar la evaluación económica de los sistemas de calefacción se trabaja con el método de evaluación financiera Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), el cual corresponde a la anualidad equivalente del VAN distribuida uniformemente a lo largo de la vida del proyecto. El método de cálculo manual es el siguiente:

$$CAUE = \frac{VAN * [r * (1 + r)^n]}{(1 + r)^{n-1}} \quad (2.26)$$

Donde r corresponde a la tasa de interés y n el número de periodos evaluados. Los sistemas de calefacción presentan vidas útiles diferentes y se utiliza un horizonte de evaluación de 20 años.

2.8.11. Indicador General

Para realizar una comparación de los sistemas de calefacción de forma completa se desarrolla un indicador general. Para lo cual recopilan los datos de emisiones de $MP_{2,5}$, $tonCO_2$, Contaminación Intradomiciliaria y el CAUE. Posteriormente se normalizan estos valores del $MP_{2,5}$ y CO_2 con la ecuación Ecuación 2.27 y el CAUE con la ecuación Ecuación 2.28 presentadas a continuación:

$$X_{norm} = \frac{X_{Max} - X^i}{X_{Max} - X_{Min}} \quad (2.27)$$

$$X_{norm} = \frac{X^i - X_{Min}}{X_{Max} - X_{Min}} \quad (2.28)$$

Donde X_{norm} es el valor normalizado de la variable X^i corresponde al valor que se esta normalizando, X_{Min} es el mínimo entre los valores evaluados y X_{Max} es el máximo entre los valores evaluados.

Para el caso de la contaminación intradomiciliaria se desarrolla la tabla Tabla 2.18 para "valorizar" los indicadores cualitativos.

Tabla 2.18: Valorización de indicadores cualitativos de contaminación intradomiciliaria.

(Fuente: Creación propia.)

Sin Contaminación	Contaminación Moderada	Contaminación Alta
1	0,66	0,33

Como último paso se le asigna un peso porcentual a cada ítem evaluado, lo cual corresponde a la relevancia que le da el investigador a cada punto a evaluar. Esto se presenta en la tabla Tabla 2.19 que se presenta a continuación:

Tabla 2.19: Valores .

(Fuente: Creación propia.)

MP 2,5	ECO2eq	Contaminación Intradomiciliaria	CAUE
16,67 %	16,67 %	16,67 %	50,00 %

Ya con estos valores definidos se calcula el Indicador General el cual viene dado por la siguiente ecuación:

$$Indicador\ General_i = \sum X_{i,h} * Z_{i,h} \quad (2.29)$$

Donde I es el conjunto de sistemas de calefacción y H el conjunto de ítem de evaluación. Posteriormente se presentan las variables $X_{i,h}$ que corresponde al valor normalizado de un sistema de calefacción i del ítem que se evalúa h y Z_h que es el peso que se le otorga a cada ítem de evaluación.

2.9. Resultados

2.9.1. Análisis de Cumplimiento de Normativas

Se analiza el cumplimiento de la normativa térmica tanto de la OGUC del año 2007 como de la Resolución Excenta 1636, para evidenciar cumplimiento de normativas en el caso base. Se observa en la Tabla 2.20 que para el muro se tiene un valor de $2,06 \frac{m^2 \cdot K}{W}$, lo cual duplica el valor exigido en la OGUC de $0,91 \frac{m^2 \cdot K}{W}$, sin embargo no se cumple con el valor de $2,50 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ de la R.1636. Por otro lado, la techumbre tiene un valor de $6,34 \frac{m^2 \cdot K}{W}$, duplicando el valor exigido en la OGUC de $3,57 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ y nuevamente cumpliendo de sobre manera la exigencia de la R.1636 de $4,00 \frac{m^2 \cdot K}{W}$. En tercer lugar, para los pisos ventilados con un valor de $1,91 \frac{m^2 \cdot K}{W}$, no se logra cumplir con las exigencias de la OGUC ni con la R.1636 con valores de exigencia de $2,56 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ en ambos casos. Por lo tanto, la vivienda presenta una aislación térmica en la techumbre que va más allá de lo óptimo, lo cual es bastante beneficiosos para el comportamiento térmico de la vivienda, ya que un 43 % (como se presenta en la Figura 2.16) del calor se pierde en el techo y un 32 % por los muros. Por otro lado, el piso no es esta suficientemente aislado como para cumplir con la reglamentación, sin embargo, puede ser una re-distribución de inversión que podría beneficiar a la retención de calor en la vivienda, ya que las pérdidas correspondientes al piso, solo corresponden a un 6 % de las perdidas totales, siendo casi marginal en comparación con el 43 % correspondiente al techo. Es evidente que con las actualizaciones de las normativas que se evidencia un alza en las exigencias de las resistencias térmicas, gran parte de las viviendas del país estarán fuera de normativa.

Tabla 2.20: Cumplimiento de normativas de resistencias térmicas de muros, techumbre y pisos ventilados.

(Fuente: Creación propia.)

	Muro	Techumbre	Pisos Ventilados
Rt $[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$	2,06	6,34	1,91
Exigencias OGUC $[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$	0,91	3,57	2,56
Exigencias R.1636 $[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$	2,50	4,00	2,56

2.9.2. Análisis de Mejoras de Aislación Térmica

En la tabla Tabla 2.21 se muestra la variación en la demanda energética respecto al caso base, al realizar una mejora de aislación térmica, donde se evidencia que el doble vidriado hermético (DVH) 6/12/6 es el que genera un mayor impacto en la disminución de la demanda energética de $-20,3 \frac{kWh}{m^2}$, posteriormente el DVH 3/4/3 con una disminución de $-17,35 \frac{kWh}{m^2}$ posteriormente mejora de aislación en la techumbre y por último en los muros.

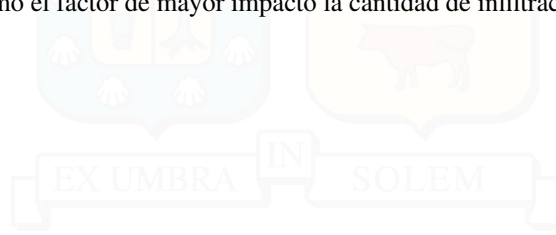
Tabla 2.21: Variación de la demanda por mejora de aislación térmica aplicada.

(Fuente: Creación propia.)

Caso	Demanda energética $[\frac{kWh}{m^2}]$	Variación respecto al caso base $[\frac{kWh}{m^2}]$	Variación porcentual respecto al caso base
Base	59,17	0,00	0,0 %
DVH 6/12/6	38,87	-20,30	-34,3 %
DVH 3/4/3	41,82	-17,35	-29,3 %
Doble capa de aislación en muros	52,49	-6,68	-11,3 %
Doble capa de aislación en techumbre	44,10	-15,07	-25,5 %

2.9.3. Análisis Infiltraciones y Demanda Energética

Se presenta el comportamiento de la demanda energética en $\frac{kWh}{m^2}$ de cada simulación realizada, donde se varía la aislación térmica de los muros, techumbre y piso, se evalúa el vidrio monolítico y doble vidriado hermético, por último se realizan variaciones en la cantidad de renovaciones de aire por hora (eje horizontal del gráfico Figura 2.36). En la Figura 2.36 se observa un crecimiento relevante en la demanda energética para calefacción de la vivienda a medida que aumentan la cantidad de renovaciones de aire por hora, notando que en el caso de 24 renovaciones de aire por hora es aproximadamente 10 veces mayor la demanda de energía que el caso óptimo de 4 renovaciones de aire por hora. Por otro lado, la mejora de aislación térmica más influyente corresponde a la mejora en el doble vidriado hermético donde la demanda energética tiene su mayor disminución, seguido de la mejora en aislación térmica de la techumbre y posteriormente los en los muros. Estas diferencias se presentan en todas las cantidades de renovaciones de aire evaluadas, sin embargo, es considerado como el factor de mayor impacto la cantidad de infiltraciones de aire.



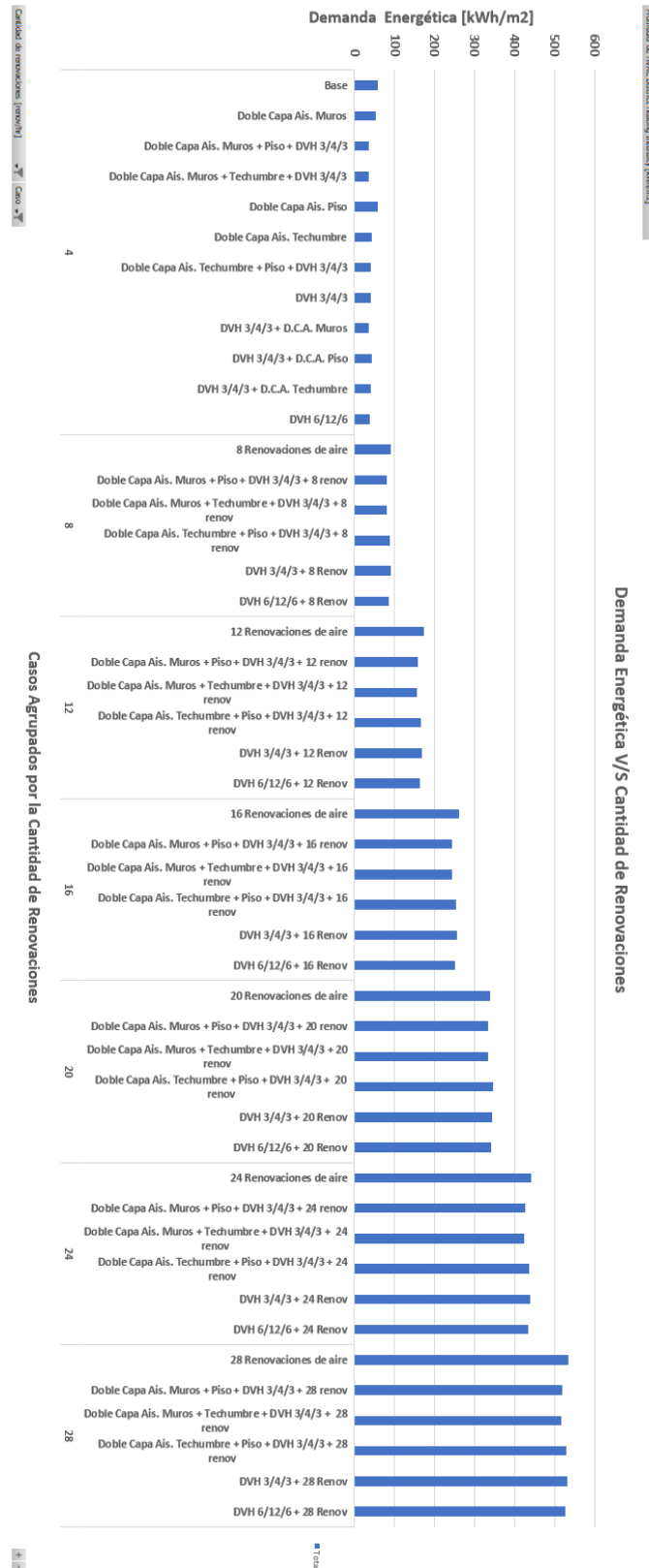


Figura 2.36: Gráfico de demanda energética según la cantidad de infiltraciones de aire.
(Fuente: Creación propia.)

En la Tabla 2.22 se exponen las variaciones máximas en la demanda energética que experimenta la vivienda al tener cierta cantidad de infiltraciones y cambiando la aislación térmica y el vidriado. Bajo las condiciones anteriores se puede observar que las variaciones de la demanda van aumentando, sin considerar el caso base de 4 renovaciones ya que bajo esta condición se realizaron otras evaluaciones, sin embargo, la tendencia es al aumentando de la demanda. Por otro lado, la variación porcentual va en disminución, esto se indica que el impacto de las mejoras en la aislación va en disminución, osea, la cantidad de demanda base es tan alta que una mejora de aislación tiene un efecto de bajo impacto llegando a un 3,4 % como se indica para el caso de 28 renovaciones de aire por hora. Para el caso de las 24 renovaciones se observa un leve aumento porcentual, esto se puede tener relación con un posible error en la simulación por parte del experimentador o puede presentarse un comportamiento anómalo que se en ese caso.

Tabla 2.22: Variación de la Demanda Energética según los Modelos con Cierta Cantidad de Renovaciones de Aire por Hora.

(Fuente: Creación propia.)

Cantidad de Renovaciones por Hora	Variación de la Demanda [kWh/m2]	Variación Porcentual de la Demanda
4	24,09	68,4 %
8	9,47	11,8 %
12	16,91	10,9 %
16	17,59	7,2 %
20	12,45	3,7 %
24	17,62	4,2 %
28	17,77	3,4 %

En la Tabla 2.23 se muestran en la primera columna las renovaciones que se comparan(en el primer caso se compara el caso de 4 renovaciones de aire por hora con el de 8 renovaciones de aire por hora), luego muestra la variación entre los promedios de las demandas de las simulaciones que tienen 4 con el promedio de las que tienen 8 renovaciones de aire por hora, donde se observa que va en aumento la diferencia, sin embargo la variación porcentual va en disminución. Esto indica que, a mayor cantidad de infiltraciones la variación porcentual de la demanda entre promedios va disminuyendo. Interpretando de lo anterior que, al aumentar la cantidad de infiltraciones su variación entre cantidades de renovaciones es menos significativa entre una cantidad de renovaciones y otra.

Tabla 2.23: Variación de la Demanda Energética entre los promedios de los modelados con una determinada cantidad de renovaciones de aire por hora.

(Fuente: Creación propia.)

Renovaciones Comparadas	Variación de la Demanda entre Promedios [kWh/m2]	Variación Porcentual de la Demanda entre Promedios
4-8	42,03	95,7 %
8-12	78,15	90,9 %
12-16	87,66	53,4 %
16-20	87,69	34,8 %
20-24	94,07	27,7 %
24-28	92,63	21,4 %

2.9.4. Análisis de Índice de Cobertura de Demanda (ICD)

Para realizar un análisis de la cobertura de la demanda es necesario comprender que significa y como interpretar los valores. Una vivienda presenta una demanda energética para mantener una temperatura de confort durante las 24 horas del día. A continuación se presentan los valores de cobertura de esta demanda con 8 horas de uso de cada sistema de calefacción para los casos de 4 y 24 renovaciones de aire por hora.

2.9.4.1. Caso 4 Renovaciones de Aire por Hora

En primera instancia se identifican 3 sistemas de calefacción que sobrepasan el 100 % de la demanda, estos son la estufa a parafina, estufa a gas licuado y estufa a leña, con un 107 %, 114 % y 205 % respectivamente. Estos comparten la característica de que son equipos no modulados, por lo que elevan las temperaturas más arriba de la necesaria para lograr la temperatura de confort, generando así, un exceso en los costos de operación y cantidad de emisiones contaminantes. Por otro lado, hay 2 equipos que son modulados que logran cumplir el 100 % de la demanda, el aire acondicionado y la estufa a pellet. Sin embargo, es importante considerar que la demanda es para mantener la temperatura en las 24 horas del día, lo cual puede no ser necesario, según la cantidad de horas que se habita. Lo anterior quiere decir que, esta la posibilidad de no considerar las horas en las que sus habitantes se encuentran durmiendo y fuera la vivienda para satisfacer la demanda, dejando un aproximado de 8 horas. Por último, el calefactor oleoeléctrico cubre el 38 % de la demanda total, este equipo si bien no cumple con la demanda energética del 100 %, tiene sobre un 33 % de la demanda total, lo cual nos dice que puede lograr la temperatura de confort durante al menos 8 horas del día.

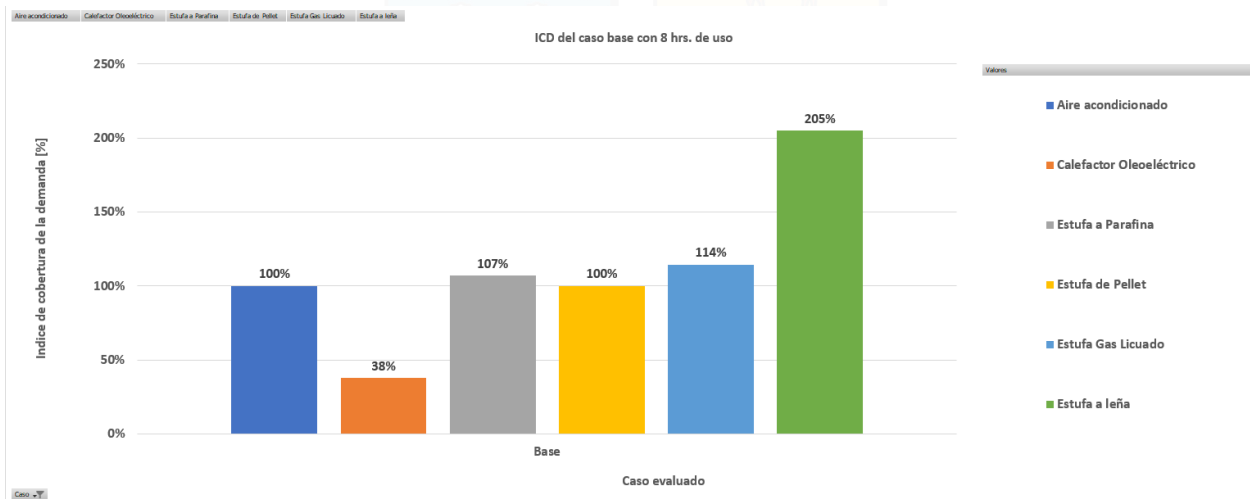


Figura 2.37: Índice de Cobertura de la Demanda por sistema de calefacción con 8 hrs. de uso.
(Fuente: Creación propia.)

2.9.4.2. Caso de 24 Renovaciones de Aire por Hora

Se puede observar que no hay equipos que en las 8 horas de operación logren cubrir el 100 % de la demanda, variando en su cobertura entre el 30 % y el 60 %, considerando lo mencionado en el caso anterior, no es necesario cumplir con el 100 % de la demanda energética. Por ejemplo, si una vivienda es utilizada (sin considerar las horas donde se duerme) durante 8 horas, bastaría con cubrir el 33 % de la demanda, logrando una temperatura de confort durante este periodo de tiempo sería suficiente para la sus habitantes. Es este caso la estufa a leña destaca con un 55 % de cobertura, luego la estufa a gas licuado con un 46 % de cobertura, en tercer lugar la estufa a parafina con un 42 % luego la estufa a pellet con un 38 % y por último, el aire acondicionado y el calefactor oleoeléctrico con un 35 % de cobertura.

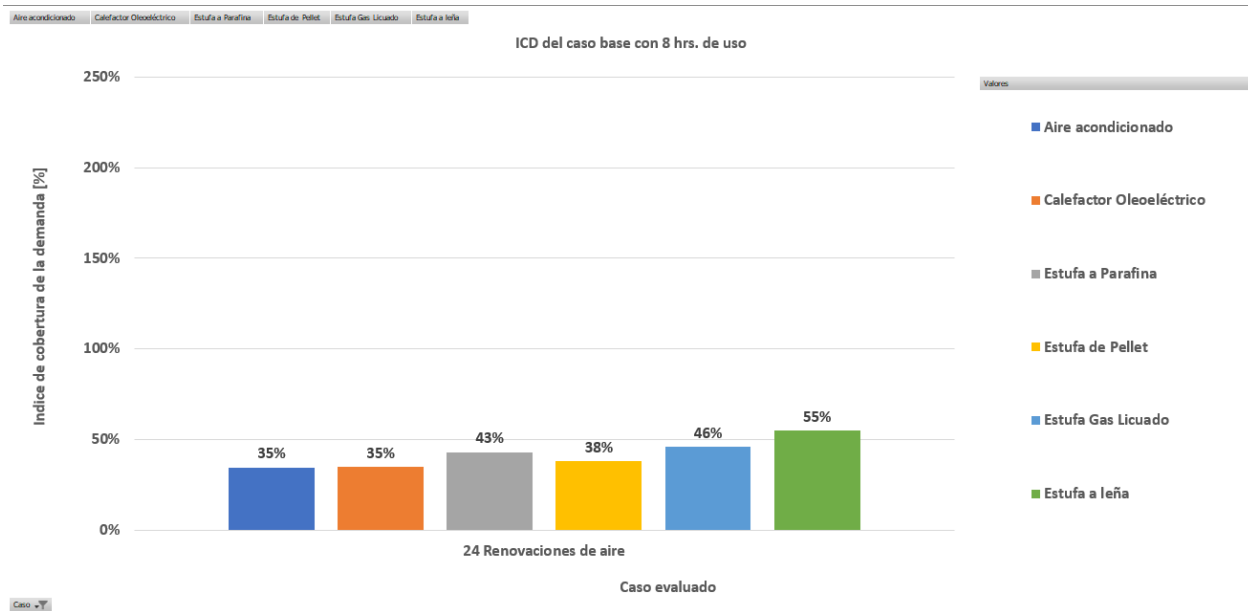


Figura 2.38: Índice de Cobertura de la Demanda por sistema de calefacción con 8 hrs. de uso.
(Fuente: Creación propia.)

2.9.5. Análisis Económico de los Sistemas de Calefacción

Se realiza un análisis económico para el caso base evaluado con una cantidad de 4 renovaciones de aire por hora, el cual es el mínimo de renovaciones posibles para esta vivienda manteniendo un aire higiénico. Por el otro lado, en el caso de 24 renovaciones de aire por hora es una situación promedio de las viviendas en Chile.

Para el caso base presentado en la Tabla 2.24 la cantidad de equipos requerida para lograr satisfacer la demanda es de un equipo para todos los sistemas de calefacción evaluados, se utiliza una tasa de descuento del 10 % como recomienda y un valor de salvamento equivalente al 10 % del costo de inversión del equipo, por otro lado el horizonte de evaluación corresponde a 20 años, debido a que todos los equipos de calefacción evaluados presentan vidas útiles en promedio entre 10 y 30 años. Junto a lo anterior las tecnologías hoy en día se van actualizando a grandes velocidades por lo que horizontes muy a largo plazo podrían implicar que la tecnología quede obsoleta, además de presentarse posibles nuevas normativas de emisiones.

En orden de menor a mayor CAUE podemos notar que la estufa a gas licuado es la que posee una menor inversión con un monto de \$149.990, sin embargo con el uso de 8 horas considerado, esta presenta un alto costo operacional con un monto de \$1.332.945, entregando un valor de CAUE de \$-11.383.175. En segundo lugar viene la estufa a parafina con una inversión de \$549.990 y un costo operacional de \$519.023 y un CAUE de \$-4.722.905, en tercer lugar esta el aire acondicionado que tiene una inversión de \$379.990 y un costo de operación de \$477.889 y un CAUE de \$-4.306.165. En cuarto lugar esta la estufa a leña, con una inversión inicial de \$469.990 y un costo de operación de \$343.887 y un CAUE de \$-3.250.790. En quinto lugar se presenta la estufa a pellet con la inversión más alta en comparación con los demás sistemas de calefacción con un monto de \$844.990 y el costo de operación más bajo con \$241.719, obteniendo un CAUE de \$-2.638.760. Por último y como calefactor óptimo en las condiciones de 4 renovaciones de aire por hora en la vivienda se presenta el Oleoelectrico, con un costo de inversión de \$159.980 un costo operacional de \$276.552 y un CAUE de \$-2.464.420.

Tabla 2.24: Ciclo económico del los sistemas de calefacción para el caso base.

(Fuente: Creación propia.)

Caso 4 Renovaciones de Aire por Hora						
Sistema de Calefacción	Estufa a Leña	Aire Acondicionado	Estufa a Parafina	Estufa a Pellet	Calefactor Oleoeléctrico	Estufa a Gas Licuado
Inversión Inicial	\$469.990	\$379.990	\$549.990	\$844.990	\$159.980	\$149.990
Cantidad de Equipos	1	1	1	1	1	1
Vida Útil	15	12	10	15	15	10
Tasa de Descuento	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %
Valor de Salvamento	\$46.999	\$37.999	\$54.999	\$84.499	\$15.998	\$14.999
Costo Anual de Operación (8 Hrs.)	\$343.887	\$477.889	\$519.023	\$241.719	\$276.552	\$1.332.945
Horizonte de Evaluación	20	20	20	20	20	20
CAUE	\$ -3.250.790	\$ -4.306.165	\$ -4.722.905	\$ -2.638.760	\$ -2.464.420	\$ -11.383.175

En la Tabla 2.25 se detalla el ciclo económico y sus indicadores para una situación de 24 renovaciones de aire por hora en la vivienda seleccionada. En este escenario, se observa un incremento en la cantidad de equipos necesarios para satisfacer la demanda energética. Específicamente, se requieren 2 estufas a leña, 2 equipos de aire acondicionado, 3 estufas a parafina, y se mantiene una estufa a pellet. Además, se registra un notable aumento en comparación con el caso anterior, con la necesidad de 6 calefactores oleoeléctricos y 3 estufas a gas licuado.

En orden de menor a mayor CAUE podemos notar que la estufa a gas licuado nuevamente es la que posee una menor inversión con un monto de \$449.970, sin embargo, presenta el costo operacional más alto con un monto de \$3.999.002, entregando un valor de CAUE de \$-34.150.948. En segundo lugar viene el calefactor oleoeléctrico con una inversión de \$959.880 y un costo operacional de \$1.941.764 y un CAUE de \$-17.191.178, en tercer lugar esta el aire acondicionado que tiene una inversión de \$759.980 y un costo de operación de \$1.932.395 y un CAUE de \$-16.926.815. En cuarto lugar esta la estufa a parafina, con una inversión inicial de \$1.649.970 y un costo de operación de \$1.557.069 y un CAUE de \$-14.168.714. En quinto lugar se presenta la estufa a pellet con una inversión de \$844.990 ya que mantiene la cantidad de equipos que en el caso anterior y nuevamente tiene el costo de operación más bajo con \$1.048.170, obteniendo un CAUE de \$-9.504.527. Por último y como calefactor óptimo, bajo las condiciones de 24 renovaciones por hora del aire de la vivienda, esta la estufa a leña con un costo de inversión de la \$939.980 un costo operacional de \$687.815 y un CAUE de \$-6.501.923.

Tabla 2.25: Ciclo económico del los sistemas de calefacción para el caso de 24 renovaciones de aire por hora.

(Fuente: Creación propia.)

Caso 24 Renovaciones de Aire por Hora						
Sistema de Calefacción	Estufa a Leña	Aire Acondicionado	Estufa a Parafina	Estufa a Pellet	Calefactor Oleoeléctrico	Estufa a Gas Licuado
Inversión Inicial	\$939.980	\$759.980	\$1.649.970	\$844.990	\$959.880	\$449.970
Cantidad de Equipos	2	2	3	1	6	3
Vida Útil	15	12	10	15	15	10
Tasa de Descuento	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %
Valor de Salvamento	\$93.998	\$75.998	\$164.997	\$84.499	\$95.988	\$44.997
Costo Anual de Operación (8 Hrs.)	\$687.815	\$1.932.395	\$1.557.069	\$1.048.170	\$1.941.764	\$3.999.002
Horizonte de Evaluación	20	20	20	20	20	20
CAUE	\$ -6.501.923	\$ -16.926.815	\$ -14.168.714	\$ -9.504.527	\$ -17.191.178	\$ -34.150.948

Las principales observaciones de la evaluación económica de los escenarios de 4 y 24 renovaciones de aire por hora para la vivienda DS-10 radican en lo siguiente: el rango de inversión para el primer caso mencionado va desde los \$149.990 a \$844.990 con un único equipo por sistema de calefacción evaluado, logrando cubrir toda la demanda. Por otro lado, en el segundo caso mencionado la inversión va desde \$449.970 a \$1.649.970, sin embargo aquí se presentan aumentos considerables en la cantidad de equipos requeridos, particularmente para el aire acondicionado y el calefactor oleoeléctrico. En cuanto a los costos de operación, se tiene que para ambos casos la estufa a pellet presenta los costos de operación considerando 8 Hrs. diarias los menores valores con \$241.719 y \$1.048.170 respectivamente y nuevamente para ambos casos el con costos de operación más altos es la estufa a gas licuado con valores de \$1.332.945 y \$3.999.002 respectivamente. Por último se evalúa el CAUE para el cual se presenta la estufa a pellet como la opción más económica para el primer caso con los CAUE menos negativos con \$-2.638.760 y para el segundo caso, la estufa a leña con un CAUE de \$-6.501.923 seguido nuevamente de la opción a pellet con un CAUE de \$-9.504.527.

La estufa a pellet se destaca como la opción más económica para ambos casos (en el caso de 24 renovaciones de aire por hora es la segunda más económica), y posee los costos operacionales relativamente bajos en comparación a los otros sistemas evaluados. Hay un aumento significativo en los costos operativos y la inversión inicial con el aumento de 4 a 24 renovaciones de aire, ya que el aumenta la demanda por lo que requiere más cantidad de equipos y mayor consumo energético para mantener una temperatura de confort. Por lo tanto, la estufa a pellet es el sistema de calefacción más consistente en términos económicos y de eficiencia para la vivienda social DS-10. El dato relevante del análisis anterior radica en que, la cantidad de renovaciones de aire tiene un impacto significativo en estos indicadores evaluados.

2.9.6. Análisis de Emisiones

A continuación se presenta el análisis de emisiones de material particulado 2,5, emisiones de gases efecto invernadero en tonCO_2 y contaminación intradomiciliaria. La Tabla 2.26 se presenta los resultados de las emisiones del caso base con 4 renovaciones de aire por hora y en la Tabla 2.27 los resultado de la simulación con 24 renovaciones de aire por hora, donde se indica que los sistemas eléctricos como el aire acondicionado y el calefactor oleoeléctrico casi no generan material particulado 2,5, a diferencia de las estufa a pellet y leña, siendo esta última la más contaminante con $2,12\text{E-}02 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$ en el caso de las 4 renovaciones, y con $4,24\text{E-}02 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$ para el segundo caso, notando así que con el aumento en la cantidad de renovaciones de aire aumentan las cantidades de emisiones de MP2,5. En segundo lugar se presentan las emisiones de gases de efecto invernadero tonCO_2 , donde se mantienen los comportamientos donde las estufas a leña y pellet son las que emiten la menor cantidad de gases efecto invernadero y las estufas a parafina y gas licuado son las que presentan la mayor cantidad de emisiones con $1,69\text{E}+00$ y $1,89\text{E}+00$ respectivamente en el caso de 4 renovaciones de aire por hora y con valores de $5,07\text{E}+00$ y $5,67\text{E}+00$ respectivamente en el caso de 24 renovaciones. Por último, la

contaminación intradomiciliaria en su evaluación cualitativa se presentan "sin contaminación" aquellos equipos que utilizan la electricidad como combustible y "contaminación alta" las de combustión de llama abierta como lo son la estufa a parafina, gas licuado y leña.

Tabla 2.26: Resultados de emisiones generadas por cada sistema de calefacción en 8 horas de uso, en el caso de 4 renovaciones de aire por hora

(Fuente: Creación propia.)

Caso Base 4 Renovaciones de Aire por Hora							
Sistema de Calefacción	Oferta Energética Anual [kWh]	Cantidad de Combustible Anual	Unidades de Combustible	Costo de Combustible Anual [CLP]	MP 2,5 [$\frac{\text{ton}}{\text{año}}$]	tonCO ₂ [$\frac{\text{ton}}{\text{año}}$]	Contaminación Intradomiciliaria
Aire acondicionado	2958,50	2958,50	kWh	\$477.889	1,01E-10	1,13E+00	Sin Contaminación
Calefactor Oleoeléctrico	1712,07	1712,07	kWh	\$276.552	5,83E-11	6,54E-01	Sin Contaminación
Estufa a Parafina	4998,00	531,51	l	\$519.023	2,66E-05	1,69E+00	Contaminación Alta
Estufa a Pellet	2958,00	597,58	kg	\$241.719	1,08E-03	8,32E-03	Contaminación Moderada
Estufa a Gas Licuado	7971,00	626,68	kg	\$1.332.945	3,82E-05	1,89E+00	Contaminación Alta
Estufa a Leña	9576,00	5,56	m3st	\$343.887	2,12E-02	4,90E-01	Contaminación Alta

Tabla 2.27: Resultados de emisiones generadas por cada sistema de calefacción en 8 horas de uso, en el caso de 24 renovaciones de aire por hora.

(Fuente: Creación propia.)

Caso 24 Renovaciones de Aire por Hora							
Sistema de Calefacción	Oferta Energética Anual [kWh]	Cantidad de Combustible Anual	Unidades de Combustible	Costo de Combustible Anual [CLP]	MP 2,5 [$\frac{\text{ton}}{\text{año}}$]	tonCO ₂ [$\frac{\text{ton}}{\text{año}}$]	Contaminación Intradomiciliaria
Aire Acondicionado	11963,00	11963,00	kWh	\$1.932.395	4,07E-10	4,57E+00	Sin Contaminación
Calefactor Oleoeléctrico	12021,00	12021,00	kWh	\$1.941.764	4,09E-10	4,59E+00	Sin Contaminación
Estufa a Parafina	14994,00	1594,54	l	\$1.557.069	7,97E-05	5,07E+00	Contaminación Alta
Estufa a Pellet	12827,00	2591,27	kg	\$1.048.170	4,66E-03	3,61E-02	Contaminación Moderada
Estufa a Gas Licuado	23914,00	1880,11	kg	\$3.999.002	1,15E-04	5,67E+00	Contaminación Alta
Estufa a Leña	19153,00	11,13	m3st	\$687.815	4,24E-02	9,80E-01	Contaminación Alta

Se identifican para ambas situaciones que los sistemas eléctricos (aire acondicionado y calefactor eléctrico) son los que presentan el menor impacto ambiental en cuanto a material particulado 2,5 y contaminación intradomiciliaria. Por otro lado, se observa que tanto la estufa a pellet como la estufa a leña son los sistemas de calefacción que presentan una menor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero. Es de suma relevancia identificar el aumento significativo en la cantidad de emisiones en todos los equipos evaluados en todos los ítem considerados al aumentar la cantidad de infiltraciones de aire de la simulación.

2.9.7. Análisis General

A continuación se presenta un análisis general, en el cual se normalizan los valores económicos y medioambientales anteriormente expuestos y se otorgan valores numéricos para la contaminación intradomiciliaria expuesto en la Tabla 2.28. Para cada ítem se entrega un "peso" porcentual otorgado por criterio del investigador, presentado en la

Tabla 2.29. Se le otorga un mayor peso al valor del CAUE debido a la relevancia en el contexto de que corresponde a una vivienda social. Los valores están normalizando de modo que un valor mayor indique un mejor desempeño.

Tabla 2.28: Valores cuantitativos para la contaminación intradomiciliaria.

(Fuente: Creación propia.)

Sin Contaminación	Contaminación Leve	Contaminación Alta
1	0,66	0,33

Tabla 2.29: Pesos porcentuales para los ítem evaluados.

(Fuente: Creación propia.)

MP 2,5	ECO _{2eq}	Contaminación Intradomiciliaria	CAUE
16,67 %	16,67 %	16,67 %	50,00 %

Para el calefactor oleoeléctrico en el caso de las 4 renovaciones de aire por hora, presenta el valor más alto con 0,94. Esto se debe principalmente a que el CAUE es bajo y al buen desempeño en términos de emisiones y contaminación intradomiciliaria. Por otro lado en el caso de 24 renovaciones de aire por hora su evaluación disminuye a 0,67, sin embargo continúa con un buen desempeño, siendo de esta forma un equipo consistente en su desempeño en ambos casos.

En cuanto a la estufa a pellet se presenta un valor de 0,93 para la vivienda con 4 renovaciones de aire por hora, esto debido a el bajo costo operacional principalmente que da como resultado un CAUE bajo. A lo anterior se suma un impacto ambiental bajo. Posteriormente en el caso de 24 renovaciones de aire por hora, su desempeño disminuye a un 0,87, esta opción pasa a ser las más viable económica y medio ambientalmente.

Como tercer equipo en evaluación se tiene el aire acondicionado, el cual presenta un valor de 0,80 para el caso de 4 renovaciones de aire por hora, el cual presenta un desempeño notoriamente bueno en cuanto a las emisiones de MP2,5 y contaminación intradomiciliaria. En cuanto a la simulación de 24 renovaciones se observa una disminución en su puntuación a un 0,68, sin embargo este se mantiene como un equipo razonable de uso, en especial al considerar sus índices de contaminación de MP2,5 y contaminación intradomiciliaria.

En cuarto lugar se evalúan juntos tanto la estufa a parafina y la estufa a gas licuado, donde se tiene que en el caso de 4 renovaciones de aire por hora, estos presentan los valores más bajos con 0,61 y 0,22 respectivamente debido a sus altas emisiones tanto de gases de efecto invernadero como de contaminación intradomiciliaria, por el lado económico, estas presentan los CAUE más negativos. Por otro lado, en el caso de 24 renovaciones de aire por hora, presenta indicadores de 0,60 y 0,22 respectivamente, indicando robustamente que en ambos casos, estos sistemas de calefacción no son las opciones sostenibles.

Por último se presenta la estufa a leña, en el caso de las 4 renovaciones de aire por hora, este presenta un indicador general de 0,63 quedando entre los 3 peor evaluados, principalmente debido a las emisiones de MP2,5 y de contaminación intradomiciliaria. En el caso de las 24 renovaciones de aire por hora tiene un indicador de 0,69 siendo el segundo mejor sistema de calefacción.

Tabla 2.30: Valores normalizados para 4 renovaciones e indicador general.

(Fuente: Creación propia.)

Caso Base con 4 Renovaciones de Aire por Hora					
Sistema de Calefacción	MP 2,5	tonCO₂	Contaminación Intradomiciliaria	CAUE	Indicador General
Aire Acondicionado	0,17	0,07	0,17	0,40	0,80
Calefactor Oleoeléctrico	0,17	0,11	0,17	0,50	0,94
Estufa a Kerosene/Parafina	0,17	0,02	0,06	0,37	0,61
Estufa a Pellet	0,16	0,17	0,11	0,49	0,93
Estufa a Gas Licuado	0,17	0,00	0,06	0,00	0,22
Estufa a Leña	0,00	0,12	0,06	0,46	0,63

Tabla 2.31: Valores normalizados para 24 renovaciones e indicador general.

(Fuente: Creación propia.)

Caso 24 Renovaciones de Aire por Hora					
Sistema de Calefacción	MP 2,5	tonCO₂	Contaminación Intradomiciliaria	CAUE	Indicador General
Aire Acondicionado	0,17	0,03	0,17	0,31	0,68
Calefactor Oleoeléctrico	0,17	0,03	0,17	0,31	0,67
Estufa a Kerosene/Parafina	0,17	0,02	0,06	0,36	0,60
Estufa a Pellet	0,15	0,17	0,11	0,45	0,87
Estufa a Gas Licuado	0,17	0,00	0,06	0,00	0,22
Estufa a Leña	0,00	0,14	0,06	0,50	0,69

3 | CONCLUSIONES

La evaluación exhaustiva de la implementación de mejoras en el aislamiento térmico, renovaciones de aire por hora y los sistemas de calefacción para la vivienda social DS-10 en Chiloé, revela la importancia crítica de la eficiencia energética en el contexto del clima local. Los resultados demuestran que las mejoras en el aislamiento térmico, particularmente en muros, techos y pisos, junto con la instalación de ventanas de doble vidriado hermético, pueden reducir significativamente la demanda energética de calefacción logrando variaciones del caso base de un 68,4 % e individualmente una disminución del 34,3 % de la demanda con el doble vidriado hermético. Sin embargo, el punto clave en la investigación radica en la cantidad de infiltraciones de aire, siendo el factor que genera un mayor impacto con su mejora, esto queda evidenciando en el Figura 2.36, donde el promedio de la demanda para 4 renovaciones de aire por hora es de $44 \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$ mientras que la demanda de 24 renovaciones de aire por hora (promedio de las viviendas en Chile) es de $433 \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$, en otras palabras, la demanda energética en calefacción residencial del estándar de renovaciones de aire en Chile es 10 veces mayor que una vivienda con la cantidad óptima de renovaciones de aire por hora. Junto a lo anterior, se observa que al implementar una mejora en la aislación térmica, ésta es más relevante entre menos infiltraciones tenga (hasta un 68,4 % de disminución), por el contrario, entre más infiltraciones tenga, menor es el impacto de la mejora de aislación térmica, como se ve en el caso de las 24 renovaciones de aire por hora, en que el impacto de las mejoras respecto al caso base logran un impacto de un 4,2 %.

A partir de la Tabla 2.10 se asume que las viviendas van cumpliendo las restricciones correspondientes a sus fechas de construcción, por lo se presenta un total de 8.322 (41,6 %) viviendas construidas que no cumplen con ninguna de las normativas, posteriormente, 3.011 (15,1 %) que cumple con la O.G.U.C. del año 2000 y 8.660 (43,3 %) que cumplen con la actualización del año 2007, sin embargo es de suma relevancia considerar que ninguna de estas normativas mencionadas toman en cuenta la cantidad de renovaciones de aire por hora, lo cual recién se comenzará a exigir el presente año 2024, siendo lo anterior es de suma relevancia, esto debido a que en esta tesis se trabaja con la variación de la cantidad de infiltraciones dejando en evidencia que este factor es el que toma un papel fundamental hoy en día para lograr la disminución de la demanda energética utilizada en calefacción de las viviendas.

El análisis de diferentes sistemas de calefacción muestra que la estufa a pellet es la opción más equilibrada y robusta para los caso de 4 y 24 renovaciones de aire por hora, ofreciendo un buen desempeño en términos económicos y desempeño moderado en cuanto a emisiones contaminantes. En el caso de las 4 renovaciones de aire por hora, se obtienen CAUE de \$-2.638.760 y de \$-2.464.420 para la estufa a pellet y el calefactor Oleoeléctrico respectivamente, siendo este último el que entrega la mejor rendimiento. Para el caso de 24 renovaciones de aire por hora, se presentan los CAUE de \$-9.504.5 y \$-6.501.923 de la estufa a pellet y la estufa a leña respectivamente. Con la información anterior, es relevante tener en consideración el impacto de las renovaciones de aire por hora, ya que estas aumentan los CAUE de todos los equipos evaluados entre hasta un 300 %.

La investigación subraya la necesidad de un enfoque integral en la mejora de viviendas sociales, que considere no solo la eficiencia energética, sino también la calidad del aire al interior de la vivienda y el impacto ambiental, ya que en épocas de alto uso de sistemas de calefacción que sean altamente contaminantes, estos tendrán efectos directos en la salud de los usuarios y de la comunidad colindante a este, teniendo efectos directos en el sistema respiratorio y otras enfermedades. En el caso de las 4 renovaciones de aire por hora, los equipos con mejores indicadores ambientales son el aire acondicionado y el calefactor oleoeléctrico, esto debido a que tienen los mejores indicadores en contaminación intradomiciliaria y en material particulado 2,5 e incluso entre los mejores indicadores de $tonCO_2$. Lo anterior se mantiene con un comportamiento similar en el caso de las 24 renovaciones de aire por hora. Las políticas públicas y los programas de mejoramiento de viviendas deben priorizar soluciones que optimicen el balance entre los costos asociados, el confort

térmico y emisiones contaminantes. Hoy en día en Castro y en el archipiélago de Chiloé, no se hay un Programa de Descontaminación Ambiental (PDA), por lo que se el desarrollo de este programas, con el objetivo de disminuir el consumo energético en calefacción residencial, ya que hoy en día se utiliza mayoritariamente la calefacción a leña en la zona, la cual tiene las emisiones más altas en contaminación intradomiciliaria y en MP 2,5.

Como recomendación, se da preferencia a sistemas que sean modulados, siendo el aire acondicionado, la estufa a pellet y el calefactor oleoeléctrico, ya que permiten evitar la sobre cobertura de la demanda. Estos equipos poseen los desempeños económicos mejor evaluados en el caso de las 4 renovaciones de aire por hora, no así en el caso de las 24 renovaciones, en el cual el calefactor oleoeléctrico tiene un incremento de precio considerable. Sin embargo estos equipos poseen las coberturas de demanda mas bajas en el caso de las 24 renovaciones de aire por hora de los sistemas de calefacción evaluados, manteniendo en todos los casos sobre un 38 % de cobertura de la demanda, siendo esto mayor a 8 horas de temperatura de confort al día. Por otro lado, el caso de 4 renovaciones de aire por hora, todos estos equipos logran una cobertura del 100 % del total de la demanda. En cuanto a emisiones, el aire acondicionado y el oleoeléctrico poseen los mejores indicadores en promedio. Dado todo lo anterior, la recomendación para realizar las mejoras más eficientes, se recomienda construir y aplicar medidas que disminuyan la cantidad de infiltraciones de aire, de esta forma cualquier mejora en la aislación térmica tiene un impacto más relevante para la disminución en la demanda energética para lograr una temperatura de confort, esto permite la utilización de sistemas de calefacción que usan como combustible la electricidad de forma económicamente conveniente, estos mismo poseen los mejores indicadores de emisiones contaminantes. La estufa a pellet es el equipo que se recomienda en el caso de 4 y 24 renovaciones de aire por hora, ya que permite la cobertura del 100 % de la demanda energética en el primer caso y sobre un 33 % en el segundo, y además, obtiene el mejor resultado de indicador general después del calefactor oleoeléctrico.

Se proponen las siguientes posibles soluciones para abarcar la disminución de infiltraciones de aire, de una forma relativamente económica. En primer lugar, se propone la técnica de calafateo en las uniones de los muros y la techumbre, con un material símil a la goma o esponja, de esta forma sellar de mejor manera estos puntos. En segundo lugar, agregar en el diseño de la vivienda una chiflonera, de esta forma se evita el ingreso de aire en gran masa al abrir la puerta principal a la vivienda o a la logia. En tercer lugar, dar una orientación a la puerta principal y trasera perpendicular a los vientos predominantes de la zona, que generalmente son norte y sur. Por último, agregar el sellado en la parte inferior de las puertas, evitando el ingreso de aire por la rendija que suele estar bajo la puerta.

3.0.1. Trabajos futuros

En continuación al estudio realizado sobre la evaluación económica, energética y ambiental de los sistemas de calefacción en la vivienda social DS-10 en Chiloé, se identifican varias áreas de investigación futura, que pueden aportar un valor al país como académico. Estos trabajos futuros buscan una mejora de la metodología y ampliar el alcance. A continuación, se presentan los trabajos futuros:

- Aplicar esta metodología para otros diseños de viviendas sociales.
- Aplicar esta metodología para otras regiones del país.
- Desarrollar una metodología que permita definir el nivel de confort deseado y, con base en este parámetro, seleccionar los equipos de calefacción adecuados.
- Agregar factores contaminantes que quedaron fuera del alcance, tales como, el MP10, las emisiones de gases al realizar la mantención del aire acondicionado, entre otros.
- Desarrollar un script que automatice el trabajo realizado, con las planillas Excel utilizadas.
- Evaluar el impacto de nuevas tecnologías de aislación térmica.
- Agregar nuevos sistemas de calefacción fuera de los tradicionales, como bombas de calor geotérmicas y sistemas solares térmicos.
- Evaluar el impacto de los sistemas de calefacción en la salud de los residentes, especialmente en términos de calidad del aire interior y la incidencia de enfermedades respiratorias.
- Hacer análisis de cómo las políticas públicas y los subsidios pueden fomentar la adopción de sistemas más eficientes y sostenibles.

- Incluir emisiones de calor de equipos eléctricos, con el objetivo de entregar un valor más exacto de demanda energética.

Con estos trabajos se espera continuar con el desarrollo no solo académico, sino también con soluciones prácticas para mejorar la calidad de vida en la viviendas sociales de nuestro país.



Bibliografía

- (Jun. de 1992). Decreto. Define el concepto de "vivienda social".
- Albornoz Montenegro, Fernando Emilio (sep. de 2022). "Evaluación de opciones de calefacción residencial para reducir emisiones al mínimo costo". Memoria de Título. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería.
- ASHRAE Standard 55-2004. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (2004). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).
- CCHC (2015). *Manual acondicionamiento térmico*. 1a. Cámara Chilena de la Construcción.
- CDT (2015). *Medición del Consumo Nacional de Leña y Otros Combustibles Sólidos Derivados de la Madera*. Informe Final. Chile.
- Construcción, Cámara Chilena de la (2008). *Aislación Térmica Exterior manual de diseño para soluciones en edificaciones*. Cámara Chilena de la Construcción.
- Corporación de Desarrollo Tecnológico (2012). *Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera*. Informe Técnico. Accedido el [insertar fecha de acceso]. Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. URL: https://www.gobiernosantiago.cl/wp-content/uploads/2014/12/Informe_Final_estudio_Lena_CDT_2012_con_anexos.pdf.
- In-Data (2019). *Informe final de usos de la energía de los hogares Chile 2018*. Corporación de Desarrollo Tecnológico.
- Desarrollo Tecnológico, Comisión de (abr. de 2016). *Manual de Re Acondicionamiento Térmico*. 1ra. Cámara Chilena de la Construcción.
- Endesa (feb. de 2024). *La energía*. URL: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/que-es-la-energia>.
- EnergyPlus (mar. de 2024). *EnergyPlus*. URL: <https://energyplus.net/>.
- Euroinnova (mar. de 2024). *que son las herramientas informáticas*. URL: <https://www.euroinnova.edu.es/blog/que-son-las-herramientas-informaticas#:~:text=Pero%2C%20entonces%2C%20C2%BFqu%C3%A9%20son,posible%20en%20alg%C3%BAAn%20dispositivo%20inform%C3%A1tico..>
- Europea, Comisión (dic. de 2023). *La Comisión acoge con satisfacción el acuerdo político sobre nuevas normas para impulsar la eficiencia energética de los edificios en toda la UE*. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_23_6423.
- Factorenergía (nov. de 2018). *Ahorrar energía con los mejores aislantes térmicos*. URL: <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/ahorrar-energia-con-aislantes-termicos/>.
- GHG Protocol (2024). *Calculation Tools and Guidance*. Accessed: 2024-06-26. URL: <https://ghgprotocol.org/calculation-tools-and-guidance>.
- Gómez, Darío R. et al. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy, Chapter 2: Stationary Combustion*. Accessed: 2024-06-26. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf.
- Inarquía (mar. de 2024). *Aislamiento Térmico para Ahorrar más Energía en la Fachada*. URL: <https://inarquia.es/la-importancia-del-aislamiento-termico-para-ahorrar-mas-energia-en-la-fachada/>.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Online; accessed 2024-06-26]. Cambridge, UK y New York, NY, USA: Cambridge University Press. DOI: [10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896). URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

- Mardones, Cristian (2021). “Ex-post evaluation and cost-benefit analysis of a heater replacement program implemented in southern Chile”. En: *Energy* 227. doi: [10.1016/j.energy.2021.120484](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120484). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221007337?via%3Dihub>.
- Medio Ambiente, Ministerio del (mar. de 2024). *Preguntas frecuentes*. URL: <https://airechile.mma.gob.cl/faq>.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2000). *Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (O.G.U.C.)* Chile: Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- (2007). *Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (O.G.U.C.)* Chile: Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- (2022). *Manual de Diseño para Soluciones en Edificaciones*. Santiago, Chile: Ministerio de Vivienda y Urbanismo. URL: https://www.minvu.gob.cl/opensite_20220601104459.aspx.
- (ago. de 2023). *Informe Primer Año Plan de Emergencia Habitacional*. Informe Técnico. Accedido el 16 de julio de 2024. Gobierno de Chile. URL: https://www.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2023/08/INFORME-PRIMER-ANO-PEH_2023.pdf.
- (2024). *Programa de Habitabilidad Rural DS10*. Accedido: 2024-06-06. URL: <https://serviumetropolitana.minvu.gob.cl/programa-de-habitabilidad-rural-ds10/#:~:text=%C2%BFen%20qu%C3%A9%20consiste%20el%20Programa,de%20quienes%20residen%20en%20ellos>.
- Ministerio del Medio Ambiente (2023). *Emisiones al aire*. URL: <https://retc.mma.gob.cl/indicadores/emisiones-al-aire/> (visitado 07-06-2023).
- (2024a). *Emisiones de Gases de Efecto Invernadero*. Accedido el 16 de julio de 2024. Gobierno de Chile. URL: <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/emisiones/>.
- (2024b). *Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica*. Accedido el 16 de julio de 2024. Gobierno de Chile. URL: <https://ppda.mma.gob.cl/>.
- Normalización (INN), Instituto Nacional de (2007). *NCh 853.Of2007 Acondicionamiento Térmico - Envoltente Térmica de Edificios - Cálculo de Resistencias y Transmitancias Térmicas*. Instituto Nacional de Normalización (INN).
- OpenStudio (2023). *EnergyPlus Input Output Reference*. The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. Golden, CO, USA. URL: <https://nrel.github.io/EnergyPlus/InputOutputReference/>.
- (mar. de 2024). *OpenStudio*. URL: <https://openstudio.net/>.
- Ozgen, Senem y Stefano Caserini (2018). “Methane emissions from small residential wood combustion appliances: Experimental emission factors and warming potential”. En: *Atmospheric Environment* 189, págs. 164-173. ISSN: 1352-2310. doi: [10.1016/j.atmosenv.2018.07.006](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.006). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135223101830445X>.
- Protección Ambiental de Estados Unidos, Agencia de (mayo de 2023). *El humo de la leña y su salud*. URL: <https://espanol.epa.gov/espanol/el-humo-de-la-lena-y-su-salud>.
- Reyes, René et al. (2015). “The firewood dilemma: Human health in a broader context of well-being in Chile”. En: *Energy for Sustainable Development* 28, págs. 75-87. doi: [10.1016/j.esd.2015.07.005](https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.07.005). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082615000770>.
- Seljeskog, Morten, Franziska Goile y Øyvind Skreiberg (2017). “Recommended Revisions of Norwegian Emission Factors for Wood Stoves”. En: *Energy Procedia* 128, págs. 708-715. ISSN: 1876-6102. doi: [10.1016/j.egypro.2017.07.181](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.181). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217304885>.
- SERVIU Metropolitano (2024). *Programa de Habitabilidad Rural (DS10)*. Accedido el 16 de julio de 2024. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Gobierno de Chile. URL: <https://serviumetropolitana.minvu.gob.cl/programa-de-habitabilidad-rural-ds10/>.
- Telmo, Lousada (2011). “Heating values of wood pellets from different species”. En: *Biomass and bioenergy* 35. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.043>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953411001188?via%3Dihub>.
- U.S. Environmental Protection Agency (2018). *Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories*. Accessed: 2024-06-26. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-03/documents/emission-factors_mar_2018_0.pdf.
- Vivienda y Urbanismo, Ministerio de (ene. de 2019a). *Manual de Procedimientos Calificación Energética de Viviendas en Chile*. 2da. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- (2019b). *Resolución 1636 Exenta*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

A | ANEXOS

A.1. Memoria de cálculo

A.1.1. Resistencias térmicas del caso base

Tipo de estructura	Muros
Condición climática	Fría
Velocidad del viento	$\geq 10 \text{ km/hr}$
Límite de la estructura	De separación con espacio exterior o local abierto
Rse + Rsi	0,12

Figura A.1: Se presentan las características para evaluar la resistencia térmica del muro.
(Fuente: Creación propia.)

Clasificación del material	Material	Densidad aparente (kg/m ³)	Conductividad térmica λ (W/(m·K))	Espesor (m)	Resistencia térmica (m ² · K/W)	U parcial (W/m ² ·K)
Compuesto	Fibro-cemento (1000kg/m ³)	1000	0,23	0,006	0,03	38,33
Maderas	Pino insignie	410	0,104	0,0762	0,73	1,36
Aislantes	Lana de vidrio AislanGlass (15kg/m ³)	15	0,04	0,05	1,25	0,80
Compuesto	Encamisado OSB 9,5 mm	600	0,103	0,0095	0,09	10,84
Gases	Aire quieto a 0°C	0,0012	0,024	0,026	1,08	0,92

Figura A.2: Se presentan las características de los materiales del muro.
(Fuente: Creación propia.)

Resultados	
Rt	2,06
U	0,485

Figura A.3: Se presentan los resultados de las resistencias térmicas del muro.
(Fuente: Creación propia.)

Tipo de estructura	Techumbre
Condición climática	Fría
Velocidad del viento	$\geq 10 \text{ km/hr}$
Límite de la estructura	De separación con espacio exterior o local abierto
Rse + Rsi	0,09

Figura A.4: Se presentan las características para evaluar la resistencia térmica de la techumbre.
(Fuente: Creación propia.)

Clasificación del material	Material	Densidad aparente (kg/m ³)	Conductividad térmica λ (W/(m·K))	Espesor (m)	Resistencia térmica (m ² · K/W)	U parcial (W/m ² ·K)
Compuesto	Yeso - Cartón (650kg/m ³)	650	0,24	0,001	0,00	240,00
Maderas	Pino insigne	410	0,104	0,0508	0,49	2,05
Gases	Aire quieto a 0°C	0,0012	0,024	0,0508	2,12	0,47
Aislantes	Lana de vidrio (30kg/m ³) extrapolación	30	0,036	0,12	3,33	0,30
Maderas	Tableros aglomerados de partículas (400kg/m ³)	400	0,095	0,0095	0,10	10,00
Maderas	Pino insigne	410	0,104	0,0508	0,49	2,05
Gases	Aire quieto a 0°C	0,0012	0,024	0,0508	2,12	0,47
Metales	Aluminio	2700	210	0,0035	0,00	60000,00

Figura A.5: Se presentan las características de los materiales de la sección 1 de la techumbre.

(Fuente: Creación propia.)

Clasificación del material	Material	Densidad aparente (kg/m ³)	Conductividad térmica λ (W/(m·K))	Espesor (m)	Resistencia térmica (m ² · K/W)	U parcial (W/m ² ·K)
Compuesto	Yeso - Cartón (650kg/m ³)	650	0,240	0,001	0,004	240,000
Maderas	Pino insigne	410	0,104	0,051	0,488	2,047
Gases	Aire quieto a 0°C	0,0012	0,024	0,051	2,117	0,472
Aislantes	Lana de vidrio (30kg/m ³) extrapolación	30	0,036	0,120	3,333	0,300

Figura A.6: Se presentan las características de los materiales de la sección 2 de la techumbre

(Fuente: Creación propia.)

Resultados	
Rt	7,00
U	0,14

Figura A.7: Se presentan los resultados de la resistencia térmica de la sección 1 de la techumbre.

(Fuente: Creación propia.)

Resultados	
Rt	5,23
U	0,19

Figura A.8: Se presentan los resultados de la sección 2 de la techumbre.

(Fuente: Creación propia.)

Tipo de estructura	Pisos ventilados
Condición climática	Fría
Velocidad del viento	>=10km/hr
Límite de la estructura	De separación con espacio exterior o local abierto
Rse + Rsi	0,17

Figura A.9: Se presentan las características para evaluar la resistencia térmica de los pisos ventilados.

(Fuente: Creación propia.)

Clasificación del material	Material	Densidad aparente (kg/m ³)	Conductividad térmica λ (W/(m·K))	Espesor (m)	Resistencia térmica (m ² · K/W)	U parcial (W/m ² ·K)
Compuesto	Fibro-cemento (1135kg/m ³)	1135	0,23	0,004	0,017391304	57,5
Maderas	Pino insigne	410	0,104	0,127	1,221153846	0,818897638
Aislantes	Lana de vidrio R100=188	11,28	0,043	0,08	1,860465116	0,5375

Figura A.10: Se presentan las características de los materiales del piso ventilado.

(Fuente: Creación propia.)

Resultados	
Rt	1,91
U	0,523

Figura A.11: Se presentan los resultados de resistencia térmica de los pisos ventilados.

(Fuente: Creación propia.)

A.1.2. Temperatura de confort

Mes	Temperatura Promedio [°C]	Andris Auliciems y Steven V. Szokolay [°C]	Simplificado de confort adaptativo [°C]	Dear y Brager [°C]
Enero	15	22,5	22,5	22,7
Febrero	15	22,5	22,5	22,7
Marzo	13	21,8	21,8	22,2
Abril	11	21,2	21,2	21,7
Mayo	9	20,6	20,9	21,2
Junio	8	20,3	20,9	20,9
Julio	7	20,0	20,9	20,7
Agosto	8	20,3	20,9	20,9
Septiembre	8	20,3	20,9	20,9
Octubre	10	20,9	20,9	21,5
Noviembre	11	21,2	21,2	21,7
Diciembre	13	21,8	21,8	22,2
Desvest	2,8	0,9	0,6	0,7
Promedio	10,7	21,1	21,4	21,6

Figura A.12: Se presentan los métodos de cálculo de temperatura de confort evaluados.

(Fuente: Creación propia.)

	Andris Auliciems y Steven V. Szokolay	simplificado de confort adaptativo	Dear y Brager
A	17,8	17,8	18,9
B	0,31	0,31	0,255

Figura A.13: Constantes utilizadas para cada método de cálculo de temperatura de confort.

(Fuente: Creación propia.)

A.1.3. Recambios de aire

Dimensionamiento		
Zona	Volumen estimado m3	Volumen de recambio por hora
Dorm 1	38,7	31,0
Dorm 2	33,7	26,9
Pasillo	15,8	7,9
Baño	12,6	125,6
Comedor	44,5	178,0
Living	37,9	151,6
Cocina	38,1	266,7
Total	221,2	787,8

Figura A.14: Se presentan los espacios considerados para el dimensionamiento del volumen de recambio.

(Fuente: Creación propia.)

Volumen total vivienda m3	221
Volumen de recambio por hora	788
Recambios totales n	4

Figura A.15: Se presentan la cantidad de renovaciones de aire por hora requeridos.

(Fuente: Creación propia.)

A.1.4. Costos de Operación y ICD

Tamaño estimado m ²	Consumo mensual en Mes más frío		horas de uso diario	4		6		8		12	
	Equipos			ICD	Costo	ICD	Costo	ICD	Costo	ICD	Costo
50	Aire acondicionado		1	65%	\$ 61.692	97%	\$ 92.538	100%	\$ 95.303	100%	\$ 95.303
	Calefactor Oleoeléctrico/Termoventilador		1	19%	\$ 18.027	28%	\$ 27.040	38%	\$ 36.054	57%	\$ 54.081
	Estufa a Kerosene/Parafina		1	54%	\$ 32.836	80%	\$ 49.254	107%	\$ 65.672	161%	\$ 98.508
	Estufa de Pellet		1	100%	\$ 48.213	100%	\$ 48.213	100%	\$ 48.213	100%	\$ 48.213
	Estufa a Gas Natural		1								
80	Estufa Gas Licuado		1	57%	\$ 56.609	86%	\$ 84.913	115%	\$ 113.218	172%	\$ 169.826
	Estufa a leña		1	103%	\$ 20.703	154%	\$ 31.054	205%	\$ 41.405	308%	\$ 62.108
	Aire acondicionado		1	40%	\$ 61.692	61%	\$ 92.538	81%	\$ 123.384	100%	\$ 152.485
	Calefactor Oleoeléctrico/Termoventilador		1	18%	\$ 28.042	28%	\$ 42.063	37%	\$ 56.084	55%	\$ 84.125
	Estufa a Kerosene/Parafina		1	33%	\$ 32.836	50%	\$ 49.254	67%	\$ 65.672	100%	\$ 98.508
120	Estufa de Pellet		1	89%	\$ 68.397	100%	\$ 77.141	100%	\$ 77.141	100%	\$ 77.141
	Estufa a Gas Natural		1								
	Estufa Gas Licuado		1	36%	\$ 56.609	54%	\$ 84.913	72%	\$ 113.218	108%	\$ 169.826
	Estufa a leña		1	64%	\$ 20.703	96%	\$ 31.054	128%	\$ 41.405	193%	\$ 62.108
	Aire acondicionado		1	27%	\$ 61.692	40%	\$ 92.538	54%	\$ 123.384	81%	\$ 185.076
	Calefactor Oleoeléctrico/Termoventilador		2	18%	\$ 40.060	26%	\$ 60.090	35%	\$ 80.119	53%	\$ 120.179
	Estufa a Kerosene/Parafina		1	22%	\$ 32.836	33%	\$ 49.254	45%	\$ 65.672	67%	\$ 98.508
	Estufa de Pellet		1	59%	\$ 68.397	89%	\$ 102.596	100%	\$ 115.712	100%	\$ 115.712
	Estufa a Gas Natural		1								
	Estufa Gas Licuado		1	24%	\$ 56.609	36%	\$ 84.913	48%	\$ 113.218	72%	\$ 169.826
	Estufa a leña		1	43%	\$ 20.703	64%	\$ 31.054	86%	\$ 41.405	128%	\$ 62.108

Figura A.16: Tabla que presenta el índice de cobertura de la demanda y los costos de operación de los equipos evaluados.

(Fuente: Planilla de cálculo Ministerio de Energía.)

Equipos disponibles a evaluar							
Equipo	Aire acondicionado	Calentador Oleoeléctrico/Termoventilador	Estufa a Kerosene/Parafina	Estufa de Pellet	Estufa a Gas Natural	Estufa Gas Licuado	Estufa a leña
Potencia (W)*	1100	1000	3000	7500	4500	4200	7000
Rendimiento del equipo	280%	100%	85%	90%	80%	65%	70%
Tipo modulante**	Si	Si	No	Si	No	No	No
Tipo Combustible	Electricidad + STI	Electricidad + STI	Kerosene	Pellet	Gas Natural	Gas Licuado	Leña
Costo combustible min	147,985	147,985	994	401		1834	58807
Costo combustible max	175,077	175,077		408		2420	64800
Unidad	CLP/kWh	CLP/kWh	CLP/l	CLP/kg	CLP/m3	CLP/kg	CLP/m3st
Costo combustible CLP/kWh min	147,985	147,985	101,9851117	81,01010101		144,1886875	34,17024985
Costo combustible CLP/kWh promedio	161,531	161,531	103,8461538	81,71717172		167,2242848	35,91138873
Costo combustible CLP/kWh max	175,077	175,077	105,707196	82,42424242		190,2598821	37,6525276

Figura A.17: Características de los sistemas de calefacción.

(Fuente: Planilla de cálculo Ministerio de Energía.)

CAUE						
Años	Leña					
-Años	0	1	2	3	4	5
-Costos						6
-Gastos Operativos	\$	343,887 \$	343,887 \$	343,887 \$	343,887 \$	343,887 \$
+Gasto Depreciación	\$	28,199 \$	28,199 \$	28,199 \$	28,199 \$	28,199 \$
Fujo de Caja	\$	-315,688 \$	-315,688 \$	-315,688 \$	-315,688 \$	-315,688 \$
+valor de salvamento						
-Inversión	\$	469,990				
Fujo de Caja Neto	\$	-469,990 \$	-315,688 \$	-315,688 \$	-315,688 \$	-315,688 \$
CAUE						
Aire Acondicionado Split Inverter						
-Años	0	1	2	3	4	5
-Costos						6
-Gastos Operativos	\$	477,889 \$	477,889 \$	477,889 \$	477,889 \$	477,889 \$
+Gasto Depreciación	\$	28,499 \$	28,499 \$	28,499 \$	28,499 \$	28,499 \$
Fujo de Caja	\$	-449,390 \$	-449,390 \$	-449,390 \$	-449,390 \$	-449,390 \$
+valor de salvamento						
-Inversión	\$	379,990				
Fujo de Caja Neto	\$	-379,990 \$	-449,390 \$	-449,390 \$	-449,390 \$	-449,390 \$
CAUE						
Estufa a Parafina						
-Años	0	1	2	3	4	5
-Costos						6
-Gastos Operativos	\$	519,023 \$	519,023 \$	519,023 \$	519,023 \$	519,023 \$
+Gasto Depreciación	\$	49,499 \$	49,499 \$	49,499 \$	49,499 \$	49,499 \$
Fujo de Caja	\$	-469,524 \$	-469,524 \$	-469,524 \$	-469,524 \$	-469,524 \$
+valor de salvamento						
-Inversión	\$	549,990				
Fujo de Caja Neto	\$	-549,990 \$	-469,524 \$	-469,524 \$	-469,524 \$	-469,524 \$

(Fuente: Creación propia)

Datos de entrada												
Sistema de Calefacción	Leña			Aire Acondicionado Split Inverter		Estufa a Parafina		Estufa a Pellet		Oleoeléctrico	Estufa Gas Licuado	
Inversión inicial	\$	469.990	\$	379.990	\$	549.990	\$	844.990	\$	159.980	\$	149.990
Cantidad de Equipos		1		1		1		1		1		1
Vida útil		15		12		10		15		15		10
Tasa de descuento		10%		10%		10%		10%		10%		10%
Valor de salvamento	\$	46.999	\$	37.999	\$	54.999	\$	84.499	\$	15.998	\$	14.999
Costo anual de Operación 8 hrs	\$	343.887	\$	477.889	\$	519.023	\$	241.719	\$	276.552	\$	1.332.945
Horizonte de evaluación		20		20		20		20		20		20
CAUE	\$	-3.250.790	\$	-4.306.165	\$	-4.722.905	\$	-2.638.760	\$	-2.464.420	\$	-11.383.175

Figura A.19: Resultados evaluación económica.

(Fuente: Creación propia)