



FACULTAD de
ARQUITECTURA
CONSTRUCCIÓN
y DISEÑO
UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO

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

OPTIMIZACION Y AJUSTE DE VARIABLES DE DISEÑO ENERGÉTICO PARA LA INTEGRACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE SISTEMAS AVANZADOS DE BOMBA DE CALOR EN VIVIENDA SOCIAL

Nombre tesista:

MARIO M. LOBO ROJAS

Marzo, 2022



MAGÍSTER EN
HÁBITAT SUSTENTABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

5 Años

Qualitas
PROGRAMA ACREDITADO

Desde el 07 de diciembre de 2017
Hasta el 07 de diciembre de 2022

SDE: Concepción MODALIDAD: Presencial

Prof Guía: Ariel Bobadilla Moreno

Prof Co-Guía:

Resumen

Resumen

En la zona centro-sur de Chile, en aquellas ciudades con baja capacidad de ventilación y alto consumo de leña para calefacción, se encuentran vigentes planes de descontaminación atmosférica, que dentro de la estrategia de reducción de índices de Material Particulado grueso, exige a la envolvente por encima de la actual norma OGUC, que repercuta en la reducción de la demanda energética y permitiría incorporar equipos de climatización más eficientes y menos contaminantes. El objetivo del estudio es encontrar una relación óptima de las variables de diseño energético de viviendas sociales para la integración de equipos de bomba de calor. Una vez estimadas las demandas energéticas, para diferentes escenarios de acondicionamiento térmico de la envolvente, como mejora de las condiciones de aislamiento térmico, optimización de la hermeticidad e instalación de ventanas eficientes, se realizó una evaluación económica utilizando indicadores económicos como el VAN y la TIR, concluyendo que dados los valores de provisión e instalación de bombas de calor en el país, es privadamente rentable instalar sistemas avanzados de bombas de calor para los escenarios propuestos y para equipos de aire acondicionado tipo On-Off con un COP de 3.2, y dos equipos Inverter con un COP de 3.61 y 4.2. Los arreglos constructivos más económicos son los más rentables, es decir, solo mejorando el aislamiento hasta 80 mm de poliestireno expandido o EPS con una densidad de 20 kg/m³. También se concluye que, dado que los equipos más eficientes también presentan buenas condiciones de rentabilidad, ya que las tasas de retorno que los hacen rentables superan el 46% de la TIR y mejoran si sube el precio de la leña dado su bajo control y supervisión, lo que resulta aún más favorable si la inversión es realizada por el Estado a través de un subsidio temporal como apalancamiento para el incentivo a la instalación de estos equipos.

Palabras claves:

- *Vivienda Social*
- *Eficiencia Energética*
- *Bombas de calor*
- *Plan de descontaminación atmosférico*
- *Aeroterminia*

Abstract

Abstract

In the central-southern zone of Chile, in those cities with low ventilation capacity and high consumption of firewood for heating, atmospheric decontamination plans are in force, which within the strategy to reduce the indexes of coarse Particulate Material, demands on the envelope above the current OGUC standard, which has repercussions in the reduction of energy demand and would allow the incorporation of more efficient and less polluting air conditioning equipment. The objective of the study is to find an optimal relationship of the energy design variables of social housing for the integration of heat pump equipment. Once the energy demands have been estimated, for different scenarios of thermal conditioning of the envelope, such as improvement of thermal insulation conditions, optimization of hermeticity and installation of efficient windows, an economic evaluation was carried out using economic indicators such as NPV and IRR, concluding that given the values of provision and installation of heat pumps in the country, it is privately profitable to install advanced heat pump systems for the proposed scenarios and for On-Off type air conditioning equipment with a COP of 3.2, and two Inverter teams with a COP of 3.61 and 4.2. The most economical construction arrangements are more profitable, that is, only improving the insulation to 80 mm of expanded polystyrene or EPS with a density of 20 kg/m³. It is also concluded that, given that the most efficient equipment also presents good profitability conditions, since the rates of return that make them profitable exceed 46% of IRR and improve if the price of firewood rises given its low control and supervision, which What an even more favorable result if the investment is made by the State through a temporary subsidy as leverage for the incentive to install this equipment

Keywords:

- Social housing
- Energy efficiency
- Heat pumps
- Atmospheric decontamination plan
- Aerothermal

Índice

Índice general

| | |
|--|------|
| Resumen | i |
| Abstract..... | ii |
| Índice general..... | iii |
| Índice de tablas | v |
| Índice de Gráficos..... | v |
| Índice de figuras | vi |
| Índice de Ecuaciones | vii |
| Estructura de la tesis | viii |
| Capítulo 1. Introducción..... | 9 |
| 1.1. Antecedentes | 10 |
| 1.2. Problema de investigación..... | 11 |
| 1.3. Preguntas e hipótesis de investigación | 11 |
| 1.4. Objetivos | 11 |
| 1.4.1. Objetivo general | 11 |
| 1.4.2. Objetivos específicos..... | 11 |
| 1.4.3. Síntesis de la metodología de investigación..... | 12 |
| Capítulo 2. La Vivienda Objeto | 15 |
| 2.1. Plan de descontaminación atmosférica del Gran Concepción..... | 15 |
| 2.2. Análisis climático zona..... | 16 |
| 2.3. La vivienda social en Chile | 22 |
| 2.4. La vivienda Objeto..... | 24 |
| 2.5. Escenarios de análisis | 27 |
| Capítulo 3. Bombas de calor..... | 33 |

Índice

| | |
|---|----|
| 3.1. Clasificación de bombas de calor..... | 35 |
| 3.1.1. Según Focos de Transporte Térmico | 35 |
| 3.1.2. Según accionamiento | 36 |
| 3.1.3. Según Reversibilidad..... | 37 |
| 3.2. Eficiencia | 39 |
| 3.3. Tipología de equipos para sistema de Bombas de Calor por Aerotermia..... | 40 |
| 3.3.1. Equipos para aerotermia – unidades compactas y exteriores | 40 |
| 3.3.2. Unidades interiores en Sistemas Aire-Aire | 46 |
| 3.3.3. Tipos de bombas Aire-Agua..... | 48 |
| 3.3.4. Unidades interiores sistemas aire – agua..... | 49 |
| 3.4. Costos estimados de provisión, instalación y mantención de equipos | 51 |
| Capítulo 4. Factibilidad Técnica - Económica..... | 53 |
| Capítulo 5. Conclusiones y Comentarios | 61 |
| Referencias bibliográficas | 65 |
| Anexo A. Tabla de Cálculo VAN y TIR, por equipos de calefacción. | 68 |

Índice

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1. Valores de transmitancia térmica (Valor U) máxima de la envolvente térmica, según PDA Concepción Metropolitano..... | 15 |
| Tabla 2.2. Porcentaje máximo permitido de superficies de ventanas según orientación y valor U, según Tabla N°15, PDA Concepción Metropolitano | 16 |
| Tabla 2.3. Superficie mínima a construir de acuerdo a tipología de vivienda (D.S. 105/08.09.2014) . | 23 |
| Tabla 2.4. Definición de escenarios de acuerdo a transmitancia térmica de la envolvente | 28 |
| Tabla 2.5. Resumen de simulaciones para cada escenario establecido | 29 |
| Tabla 2.6. Potencia requerida por Calefacción para cada escenario | 30 |
| Tabla 2.7. Resumen de simulaciones para cada escenario establecido | 31 |
| Tabla 4.1. Equipos de combustión lenta a leña..... | 54 |
| Tabla 4.2. Desglose costo de electricidad para la ciudad de Concepción - CGE..... | 55 |
| Tabla 4.3. Equipos propuestos para análisis de factibilidad..... | 56 |
| Tabla 4.4. Valores de provisión e instalación por mejoramiento propuesto | 57 |
| Tabla 4.5. Valores de inversión inicial para los escenarios planteados y 3 equipos propuestos | 58 |
| Tabla 4.6. Valores de energía consumida para los escenarios planteados y 3 equipos propuestos ... | 58 |
| Tabla 4.7 Resultados de evaluación económica para los escenarios y equipos propuestos | 59 |
| Tabla 4.8 Resultados de evaluación económica para los escenarios y equipos propuestos | 60 |
| Tabla 4.9 Resultados de evaluación económica para los escenarios y equipos propuestos | 60 |

Índice de Gráficos

| | |
|--|----|
| Gráfico 2.1. Suma anual de demanda de calefacción y enfriamiento | 29 |
| Gráfico 2.2. Potencia requerida de calefacción y refrigeración (kW) por escenario | 30 |
| Gráfico 2.3. Ordenamiento de menor a mayor demanda de calefacción, enfriamiento y suma total | 31 |

Índice

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Rangos de Confort - zona de estudio | 18 |
| Figura 2.2.Grafica de Temperatura diaria anual | 19 |
| Figura 2.3 Perfil de temperaturas anuales a las 8:00 am. | 19 |
| Figura 2.4. Perfil de temperaturas anuales a las 15:00 am. | 20 |
| Figura 2.5. Carta Psicométrica mes de Enero..... | 20 |
| Figura 2.6. Elevación Norte y Sur - Vivienda Objeto..... | 21 |
| Figura 2.7. Datos climáticos por mes – Concepción..... | 22 |
| Figura 2.8. Elevación Norte y Sur - Vivienda Objeto..... | 25 |
| Figura 2.9. Elevación Oste y Este - Vivienda Objeto..... | 26 |
| Figura 2.10. Imagen renderizada - Vivienda objeto..... | 26 |
| Figura 2.11. Planta de arquitectura y tabla superficie útil - Vivienda objeto | 27 |
| Figura 3.1. Esquema proceso mecánico | 33 |
| Figura 3.2. Descripción sistema alimentado mediante electricidad | 37 |
| Figura 3.3. Descripción sistema alimentado mediante combustión a gas natural (Fuente: IDAE – España)..... | 37 |
| Figura 3.4. Descripción sistema interno bomba de calor reversible (Fuente: IDAE – España)..... | 38 |
| Figura 3.5. Descripción sistema interno bomba de calor reversible (Fuente: IDAE – España)..... | 39 |
| Figura 3.6. Especificaciones Bomba de Calor marca MIDEA | 40 |
| Figura 3.7. Equipo de ventana. | 41 |
| Figura 3.8.Unidades exterior e interior de un sistema de bomba de calor tipo split | 42 |
| Figura 3.9. Equipo portátil de aire acondicionado | 44 |
| Figura 3.10. Modelo de equipo interior del tipo suelo - techo..... | 46 |
| Figura 3.11. Modelo de equipo interior del cassette | 47 |
| Figura 3.12 Modelo de equipo interior para conductos | 47 |

Índice

| | |
|---|----|
| Figura 3.13. Modelo de equipo interior tipo Split de pared | 47 |
| Figura 3.14. Bomba de calor compacta para agua caliente sanitaria (IDAE)..... | 49 |
| Figura 3.15. Modelo de radiador (IDAE)..... | 49 |
| Figura 3.16. Piso radiante (IDAE)..... | 50 |
| Figura 3.17. Cielo radiante (https://pansogal.com/ | 51 |
| Figura 4.1. Etiqueta Eficiencia Energética calefactor a leña | 54 |

Índice de Ecuaciones

| | |
|---|----|
| Ecuación 2.1. Cálculo de rangos de temperatura de confort, según Szokolay | 17 |
| Ecuación 3.1. Coeficiente de rendimiento COP – Modo calefacción | 39 |
| Ecuación 3.2. Calificación rendimiento energético – Modo enfriamiento | 39 |

Estructura de la tesis

Estructura de la tesis

El presente estudio se estructura en 5 capítulos que desarrollarán uno a uno de manera independiente los distintos temas abordados en los siguientes capítulos:

El capítulo 1, considerado la introducción, plantea la necesidad de desarrollar el tema, contextualizando la realidad local, asociado a la relación de la eficiencia energética de la vivienda social y la posibilidad de incorporar equipos de alta eficiencia con la factibilidad técnica y económica adecuada al tipo de financiamiento de la misma.

El capítulo 2, presenta una descripción de la vivienda social en el país y que se encuentra definida por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, en cuanto a superficie tipo de recintos necesarios entre otros elementos técnicos. Así mismo, se describe el estándar en cuanto a caracterización de la envolvente de la vivienda, que, por estar localizado en la ciudad de Concepción, último Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) que entró en vigencia en el país. En este capítulo se determinarán los escenarios propuestos de mejoramiento de estándar por sobre el PDA vigente de manera poder estimar costos asociados para posteriormente efectuar análisis de sensibilidad y factibilidad económica.

En el capítulo 3, se mostrará una descripción de los sistemas de bomba de calor del tipo aire – aire y muestra en general los otros tipos de bombas de calor a modo informativo.

En el capítulo 4, presentará los resultados obtenidos, el dimensionamiento de los equipos requeridos para mantener la temperatura en los rangos de confort, asociado el costo de instalación, indicadores de rentabilidad en el tiempo y factibilidad de incorporación de los equipos en condiciones de financiamiento mediante subsidio estatal.

Finalmente, en el capítulo 5, se presentarán los comentarios y principales conclusiones así como eventuales nuevas propuestas a evaluar en próximos estudios como la incorporación de otros sistemas como bomba de calor aire – agua, lo que permitiría incorporar radiadores por recintos, suelo radiante e incluso agua caliente sanitaria.

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

Capítulo 1. Introducción

En Chile, producto de alta contaminación atmosférica, se encuentran vigentes los denominados Planes de Descontaminación Atmosférica, en adelante P.D.A., en aquellas comunas que a causa de la calefacción predominantemente a combustión de leña, presentan altos índices de contaminación por material particulado MP 10 y MP 2.5, este último que es el más perjudicial para la salud humana, Entre las ciudades del centro sur de Chile que cuenta con P.D.A. vigente se encuentran: Talca, Maule, Curicó, Chillán y Chillán Viejo, Concepción, Los Ángeles, Temuco y Padre Las Casas, Osorno y Coyhaique.

En la búsqueda de distintos sistemas de calefacción, los P.D.A. plantean el uso de distintos tipos de artefactos, con más o menos emisiones a la atmosfera como estufas a leña certificadas, estufas a pellet, sin embargo, y principalmente por limitaciones económicas, no se han desarrollado estudios sobre sistemas avanzados como por ejemplo bombas de calor, cuya ventaja radica en que es capaz de suministrar más energía útil, e incluso satisfaciendo demandas tanto de calefacción, enfriamiento e incluso agua caliente sanitaria, dependiendo del tipo de equipo instalado. Específicamente en calefacción, los ahorros que puede generar alrededor al 70% respecto de aquellos sistemas considerados tradicionales, esto según los proveedores de equipos

La finalidad de este estudio es conocer, sí es posible encontrar un ajuste adecuado de las variables que intervienen en el desempeño energitético de una vivienda, de modo de hacer rentable técnica, económica y socialmente sistemas de bomba de calor. Esto, en el entendido que el desarrollo de esta tecnología en proyectos de vivienda social, tiene principalmente una limitación económica, haciéndose rentable este tipo de sistemas para una combinación de variables como transmitancia térmica de muros, cubierta, piso, ventanas y puertas, así como otros factores como hermeticidad y protección solar, limitando de esta forma tamaño, potencia y eficiencia de los equipos para demandas de calefacción y enfriamiento para vivienda social en Concepción, comuna que se encuentra dentro de aquellas con P.D.A vigente, situación que hace prioritario que los sistemas de calefacción generen menor cantidad de emisiones a la atmosfera.

Respecto a la tecnología que se plantea en este estudio, se puede indicar que, aunque existen numerosas aplicaciones para las bombas de calor, no solo en lo referente a la climatización para confort, tanto para calefaccionar y enfriar ambientes, y a la producción de ACS, sino en otros ámbitos como el industrial, dependerá de la tipología que se esté usando, la que variará de acuerdo

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

a la naturaleza de las fuentes, tanto exterior e interior, en las que se intercambia calor. Sin embargo, para el uso en una de vivienda se hace recomendable que los artefactos entreguen aire frío o caliente dependiendo del requerimiento, el que es impulsado por ventiladores y que cumplirá con la función de acondicionar el recinto y/o vivienda analizada.

De esta forma, la instalación de sistemas de bomba de calor, en vivienda supone un avance importante tanto en eficiencia energética dado los altos rendimientos que presentan y que como ocurre con los sistemas o equipos tecnológicos, así como desde el punto de la sustentabilidad al usar energía eléctrica, a través de los años ha aumentado su generación a través de energías renovables.

1.1. Antecedentes

Dado los altos índices de contaminación atmosférica, presentes en las ciudades del centro sur de Chile, se hace necesaria la búsqueda de tecnologías que por su alto costo no han sido consideradas en la solución o parte de la estrategia para descontaminarlas, como lo son los sistemas avanzados de bomba de calor, que además de satisfacer la demanda energética de calefacción, pueden satisfacer la de enfriamiento, que aunque en inicio presenten altos costos de inversión, se plantea que tanto los costos de operación y bajo consumo de combustible, sea una estrategia rentable además de socialmente aceptada tanto en su uso como en la disposición del ente regulador como alternativa, reduciendo tanto las emisiones de material particulado tanto PM10 y PM2,5, emisiones de CO₂, energía primaria utilizada en la fabricación.

En actualidad, se están desarrollando diversas iniciativas, tendientes a fijar tanto nuevos valores de variables térmicas asociadas a la puesta en marcha de los planes de descontaminación atmosférica, sin embargo, esto no ha ido de la mano de fomentar el desarrollo de nuevas tecnologías o adaptar tecnologías que existen a las demandas asociadas a los nuevos estándares que se están desarrollando, permitiendo reducciones en el consumo energético que permitan la rentabilidad en vivienda de carácter social.

El poder identificar una combinación de variables que permitan optimizar los sistemas es relevante para incentivar la generación de esta tecnología trayendo consigo mejorar el confort térmico al interior de las viviendas y además de disminuir la emisión CO₂, disminuyendo por tanto su huella de carbono y la de material particulado principalmente en aquellas comunas en que se encuentra vigente un plan de descontaminación atmosférica.

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

1.2. Problema de investigación

Dado el grave problema de contaminación atmosférica por material particulado MP 2,5 que afecta al Gran Concepción, producto del uso de sistemas de calefacción a leña ineficientes que se presentan en un alto porcentaje en las viviendas existentes, asociado además, a que parte de la estrategia para disminuir los niveles de material particulado resulta de aumentar el estándar de las variables energéticas de las viviendas, de manera de eliminar las estufas a leña cambiándolas por aquellas que presenten limitadas emisiones, este estudio apunta a resolver qué combinación de características técnicas de la envolvente de una vivienda nueva y equipos de climatización en base a bomba de calor puedan dar respuesta de manera eficiente y rentable a la utilización de esta tecnología en viviendas de carácter social y que pueden ser objeto de un subsidio estatal.

1.3. Preguntas e hipótesis de investigación

Se plantea en la presente investigación, que ajustando y combinando las características energéticas de la envolvente de las viviendas sociales que se ejecutan en el país y específicamente en la ciudad de Concepción, es posible dimensionar e incluir sistemas de climatización de tecnología avanzada como las bombas de calor del tipo aire – aire, cumpliéndose que los costos de la electricidad y de los materiales para el acondicionamiento térmico se mantienen en precios razonables.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar la combinación de variables de diseño energético, que permita dar rentabilidad técnica y económica, que permita la incorporación de sistemas de bomba de calor, en proyectos de vivienda social en la ciudad de Concepción.

1.4.2. Objetivos específicos

Objetivo 1: Determinar la demanda energética por calefacción y enfriamiento vivienda de carácter social tipo identificada.

Objetivo 2: Recopilar información técnica sobre tipos de bomba de calor del tipo aire – aire, que permita satisfacer demandas de calefacción y enfriamiento en una vivienda de carácter social.

Objetivo 3: Determinar factibilidad económica con la finalidad de que sea aceptable como solución en viviendas sociales con financiamiento estatal.

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

1.4.3. Síntesis de la metodología de investigación

Se propone una investigación de carácter experimental, en que el objetivo es determinar por medio de un análisis de sensibilidad qué configuración de parámetros de la envolvente de una vivienda de carácter social, permiten reducir su demanda energética al punto de rentabilizar tanto económicamente como social, a sistemas avanzados y eficientes, no contaminantes, en vivienda social, teniendo en cuenta que la restricción que se tiene de implementar estos sistemas es principalmente económica, dado que en general se trata de viviendas financiadas a través de subsidios estatales.

3.1 Metodología para el cumplimiento del Objetivo Especifico N°1 **“Determinar la demanda energética por calefacción y enfriamiento vivienda social tipo identificada”.**

Se deberá considerar un tipo de vivienda que responda tanto a la superficie y materialidad, que mayoritariamente, tanto el Estado como la empresa privada presenta como oferta al mercado inmobiliario. Este catastro se obtendrá de estudios elaborados por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, como el denominado, “Estudio Para Caracterizar El Parque Construido De Viviendas Hasta El Año 2018, En Función De Los Principales Parámetros Que Influyen En Su Demanda De Energía”, así como de otros ya elaborados con anterioridad y que permitirán determinar las demandas de estas viviendas consideradas como de mayor representatividad.

La determinación la demanda y/o consumo energético será utilizando el programa informático de simulación dinámica, como Design Builder, cuyo modelo deberá ser reflejo de las condiciones normales de funcionamiento del mismo. Debiendo estimarse demanda de calefacción y enfriamiento, siguiendo los siguientes pasos:

- Representación el modelo geométrico de la vivienda seleccionada, en cuanto a su diseño y programa arquitectónico y sus especificaciones técnicas.
- Validación de archivo climático, del lugar de emplazamiento de la vivienda en estudio, en este caso para la ciudad de Concepción.
- Estimación de condiciones de borde relativas a usos, cantidad de personas, horarios, ganancias térmicas de equipos, etc.

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

- Generación del modelo informático con las características de los distintos componentes de la envolvente del edificio como transmitancia térmica, hermeticidad al aire, acristalamientos, entre otros.
- Con los modelos definidos en todos sus ámbitos, se procederá a estimar las demandas en 4 orientaciones de forma de obtener un valor promedio de manera de no privilegiar orientaciones más o menos favorables.

En este ámbito, se plantea efectuar un análisis, en primer lugar, respecto al requerimiento normativo vigente, que corresponde a lo dispuesto en el respectivo plan de descontaminación atmosférico para el Gran Concepción, para luego generar distintos escenarios con combinaciones de valores de transmitancias térmicas mejoradas para piso, muro, cubierta, ventanas, así como para este último caso factor solar. De este modo, se podrá relacionar los escenarios planteados con las configuraciones de equipos que satisfacen el requerimiento de calefacción y enfriamiento.

3.2 Metodología para el cumplimiento del Objetivo Especifico N°2 **“Recopilar información técnica sobre tipos de bomba de calor del tipo aire – aire, que permita satisfacer demandas de calefacción y enfriamiento en una vivienda de carácter social”.**

Se realizará una revisión bibliográfica sobre estado del arte de la tecnología existente tanto en Chile como a nivel mundial, de equipos de alta eficiencia del tipo bomba de calor tipo aire – aire que satisfaga necesidades de calefacción y enfriamiento. Se procurará analizar que la técnica en la implementación de estos sistemas esté efectivamente desarrollada e instalada en el país de forma de poder estudiar equipos con las potencias adecuadas a la tipología de vivienda en estudio.

Habiendo ya establecido los distintos escenarios de demandas para las distintas configuraciones de combinaciones con las variables analizadas, es posible efectuar el dimensionamiento y selección de los tipos de sistemas eficientes de acuerdo a los parámetros de selección de cada equipo, las condiciones de borde definidas como parámetros o requerimientos de temperaturas interiores definidas como de confort interior.

3.3 Metodología para el cumplimiento del Objetivo Especifico N°3 **“Determinar factibilidad económica con la finalidad de que sea aceptable como solución en viviendas sociales con financiamiento estatal”.**

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

Como se ha indicado, la evaluación económica y social de los sistemas seleccionados permitirá indicar si respecto al financiamiento de las viviendas sociales en la zona de estudio, es posible incorporar estos sistemas eficientes de climatización de las viviendas, comparando las distintas alternativas propuestas, considerando como base lo exigido en la aplicación e implementado del Plan de Descontaminación Atmosférica. Esta comparación establecerá las diferencias de inversión y la reducción de la demanda energética y por lo tanto el consumo energético con los sistemas propuestos.

Con este análisis, se podrá determinar los siguientes puntos:

- Evaluar la viabilidad económica de las soluciones.
- Comparar las propuestas en los distintos escenarios planteados desde el punto de vista costo eficiencia.
- Determinar si a través de financiamiento a través de subsidios estatales es factible la incorporación de sistema de climatización de

Cada escenario propuesto, debiera resultar en una mejora en el nivel de demanda energética de las viviendas estudiadas comparadas desde la condición con cumplimiento normativo vigente y aplicación de P.D.A, debiéndose analizar estas mejoras dentro de rangos aceptables y sin la superposición de variables a la vez, de forma que los efectos de cada una no contrarreste el efecto de otra medida de mejoramiento y no superponer mejoramientos a las variables térmicas analizadas, de tal manera de no incrementar los costos asociados.

Como ya se conocen valores referenciales de demanda y valores de transmitancias térmica tanto para la condición base y con PDA, se realizará mediante software de análisis de sensibilidad, distintos escenarios con las variables en estudio, mediante la aplicación de estrategias de aislación en sus distintos componentes, hermeticidad y protección solar, que por un lado afectan la demanda energética, también inciden en el presupuesto de inversión, determinado de esta manera para cada tipología, los 3 escenarios más rentable a los que se les determinará su rentabilidad social.

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

Este capítulo desarrollará las características que definen a una vivienda como vivienda social, en el contexto de que en la zona de estudio que es la ciudad de Concepción, se encuentra en aplicación un Plan de Descontaminación Atmosférica.

2.1. Plan de descontaminación atmosférica del Gran Concepción

Con fecha 17 de diciembre de 2019, entró en vigencia la normativa que establece el Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concepción Metropolitano y que en las materias que son atingentes a este estudio y la edificación en general, en su artículo 25, y más precisamente en la tabla N°11 de dicha norma, indica que toda vivienda nueva cumplir con los valores de transmitancia térmica máxima de la envolvente, la que se transcribe de manera íntegra en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Valores de transmitancia térmica (Valor U) máxima de la envolvente térmica, según PDA Concepción Metropolitano

| Elemento | Estandar | Valor |
|-----------------|-------------------------------|--------------|
| Techo | | 0.33 |
| Muro | Valor U (W/m ² °K) | 0.60 |
| Piso Ventilado | | 0.60 |
| Puerta | | 1.70 |

Otro requerimiento que impone la aplicación del P.D.A es la relativa a que las soluciones técnicas planteadas, disminuyan la probabilidad de riesgo de condensación tanto intersticial como superficial.

En cuanto al acristalamiento, si bien no exige un determinado valor de transmitancia térmica de ventanas, si plantea valores máximos asociados al porcentaje de superficie, el que podrá analizarse por orientación o bien de manera ponderada, si es que los vanos no superan el 60% del total de superficie de vanos. Esto, de acuerdo a lo indicado en la Tabla N°2.2.

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

Tabla 2.2. Porcentaje máximo permitido de superficies de ventanas según orientación y valor U, según Tabla N°15, PDA Concepción Metropolitano

| Orientación | % v/s Transmitancia Térmica (U) | | | | | | | | | |
|------------------------------|--|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| U (W/m²°K) | ≤1.2 | ≤1.6 | ≤2 | ≤2.4 | ≤2.8 | ≤3.2 | ≤3.6 | ≤4 | ≤4.4 | ≤5.8 |
| Norte | 87% | 85% | 83% | 80% | 78% | 75% | 71% | 67% | 61% | 10% |
| Oriente - Poniente | 60% | 58% | 56% | 54% | 51% | 48% | 45% | 41% | 35% | 8% |
| Sur | 48% | 46% | 44% | 41% | 38% | 35% | 31% | 26% | 20% | 0% |
| Ponderado | 37% | 36% | 34% | 32% | 30% | 28% | 2.6% | 23% | 19% | 5% |

Otros requisitos que exige el cumplimiento del P.D.A tienen relación con el control de las infiltraciones de aire la que queda limitada a 5 Ach, de acuerdo al estándar del Manual de Hermeticidad (CITEC) a una presión de 50 Pa. En este mismo ámbito, se exige que las puertas y ventanas permitidas deben cumplir con un Grado de Estanqueidad al viento a 100 Pa con un valor de 10 m³/h m²).

Otro pilar de exigencia que exige el P.D.A la incorporación de un sistema de ventilación, debiendo considerar sistemas mecánicos de extracción del aire con control de higrostatos en baños y cocinas, pudiendo ser las entradas de aire natural o mecánica. Se entiende, de esta manera, que cumpliendo con este estándar, que es específico para la zona de aplicación de plan de descontaminación, se efectuaría una reducción de la demanda energética en viviendas y por ende se disminuiría consecuentemente la contaminación atmosférica. Esto complementado con los sistemas de calefacción de baja emisión de material particulado y de alta eficiencia en el consumo del energético utilizado.

Por lo tanto, la estimación de demanda energética de la vivienda objeto, comenzará con el estándar mínimo aplicable y actualmente en la zona de estudio es el estándar P.D.A del Gran Concepción.

2.2. Análisis climático zona

La región del Biobío es considerada una zona de transición entre climas templados secos de la zona central de Chile y los climas templados lluviosos, que comienzan a desarrollarse desde el borde sur de la cuenca del río Itata. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, la comuna se inscribe dentro de un clima templado cálido con lluvias invernales y gran humedad atmosférica (Csb n's).

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

La temperatura media anual es de 13,3°C. De acuerdo con el registro climático para cada hora del año típico de diseño se tiene como mínimo 5°C, registro posible en los meses de junio y julio, así como una máxima de 23°C posible de registrarse entre los meses de enero a marzo.

De esta manera se puede predecir que las viviendas objeto de este análisis están sometidas durante el año a diversos requerimientos debiendo proporcionar las condiciones de confort ambiental interior como temperatura y humedad en los estándar adecuados para la habitabilidad.

Como los análisis se efectuarán en el software Design Builder, basado en Energy Plus, se requiere determinar las condiciones de borde donde se deben definir los parámetros de funcionamiento de los sistemas mecánicos para climatización de la vivienda y así determinar demanda energética. Una de estas condiciones iniciales son las temperaturas de confort de la vivienda, para lo que se considerará lo recomendado por Szokolay, extraído del Manual de Evaluación para la Certificación Edificio Sustentable – CES, en que define rangos de confort 2.5°C superior e inferior a la definición de una temperatura normal, efectuada mediante la siguiente formula:

Ecuación 2.1. Cálculo de rangos de temperatura de confort, según Szokolay

$$T_n = 17.6 + 0.31T_m \quad (\text{Temperatura normal})$$

$$T_{max} = T_n + 2.5$$

$$T_{Min} = T_n - 2.5$$

La Figura 2.1, muestra el registro climático en que si se considera como temperaturas adecuadas entre 18.3 y 25.9°C, la zona presenta un 87.4% fuera de confort, tanto por altas pero principalmente por bajas temperaturas. El 12.6 % de estas horas, equivalente a 1101 horas a lo largo del año se presentan dentro del rango de confort por temperatura.

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

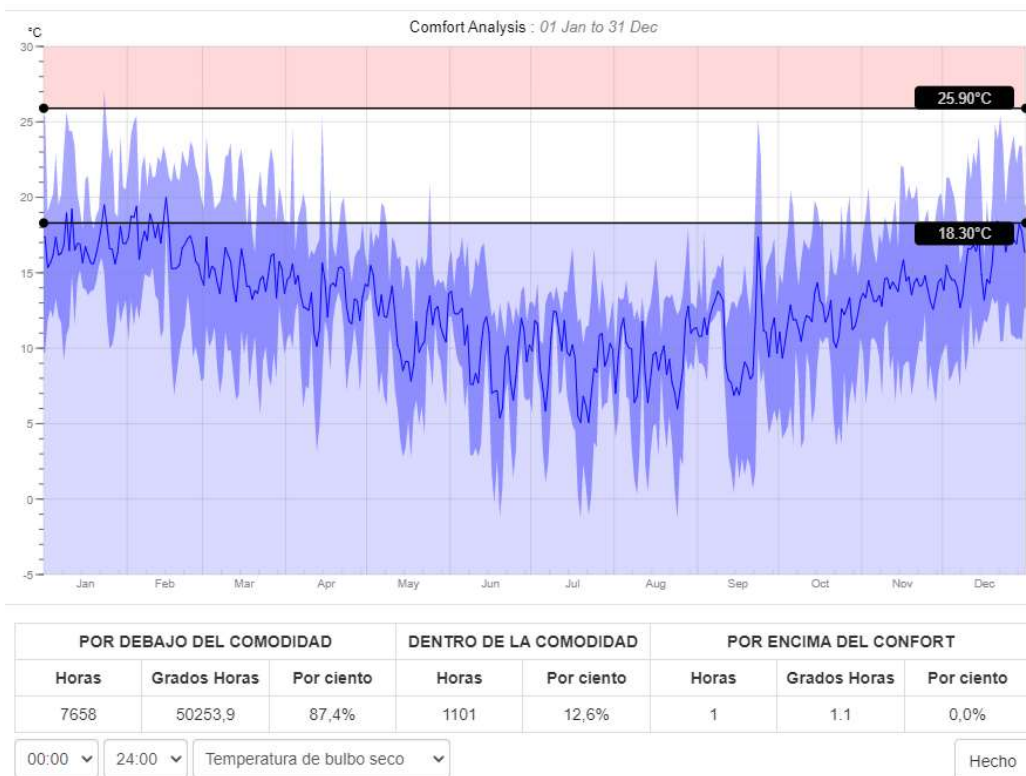


Figura 2.1 Rangos de Confort - zona de estudio

De esta manera, la orientación, tipo de ventanas y envolvente, son los factores principales para obtener condiciones favorables al interior las viviendas con temperaturas dentro del rango de confort indicado.

La figura 2.2 muestra las temperaturas anuales mediante una representación de los datos en una gráfica tridimensional.

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

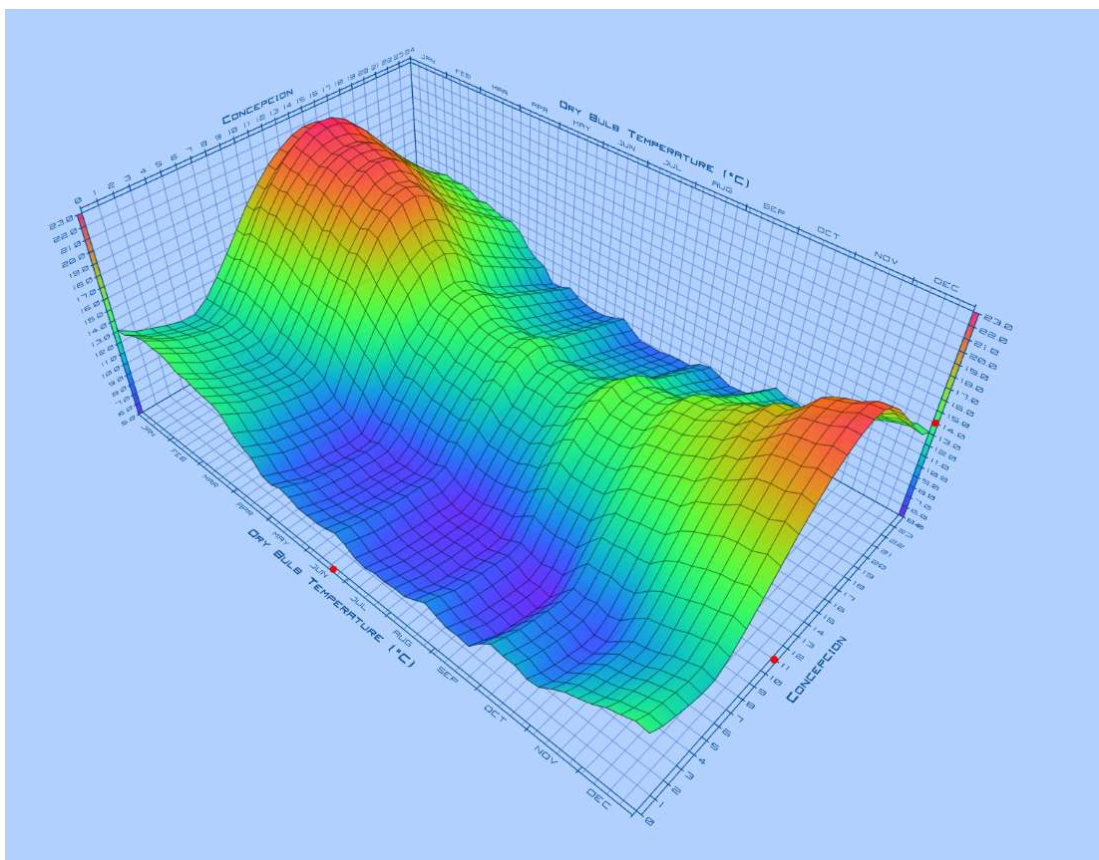


Figura 2.2. Grafica de Temperatura diaria anual

Las figuras 2.3 y 2.4, muestran un perfil de temperaturas durante el año a una cierta hora. Es decir, el perfil de temperaturas a las 8:00 am durante todo el año a las 15:00 hrs. respectivamente.

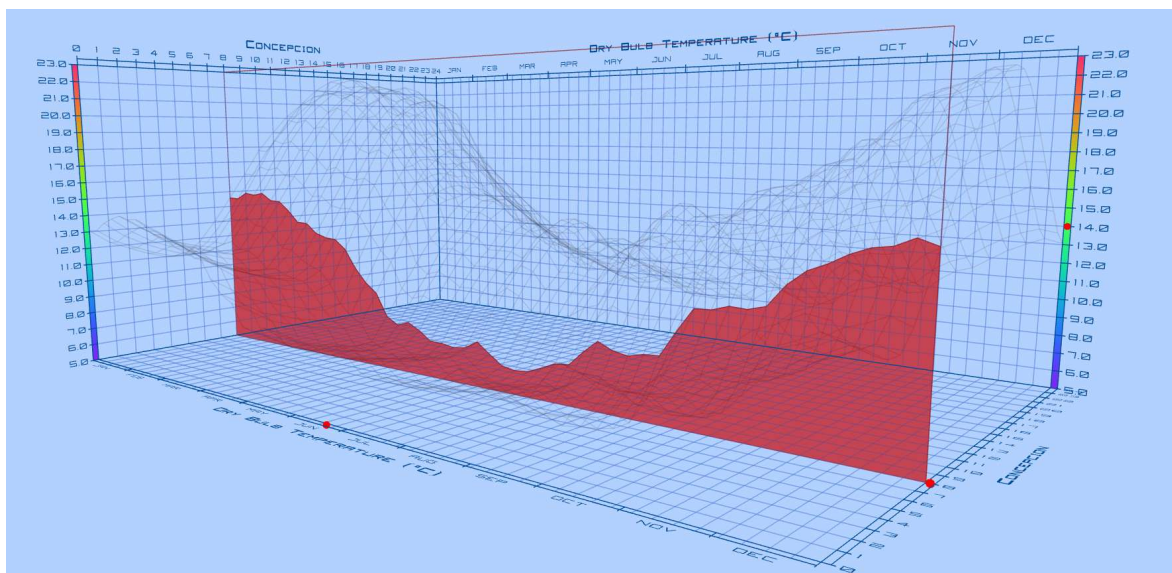


Figura 2.3 Perfil de temperaturas anuales a las 8:00 am.

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

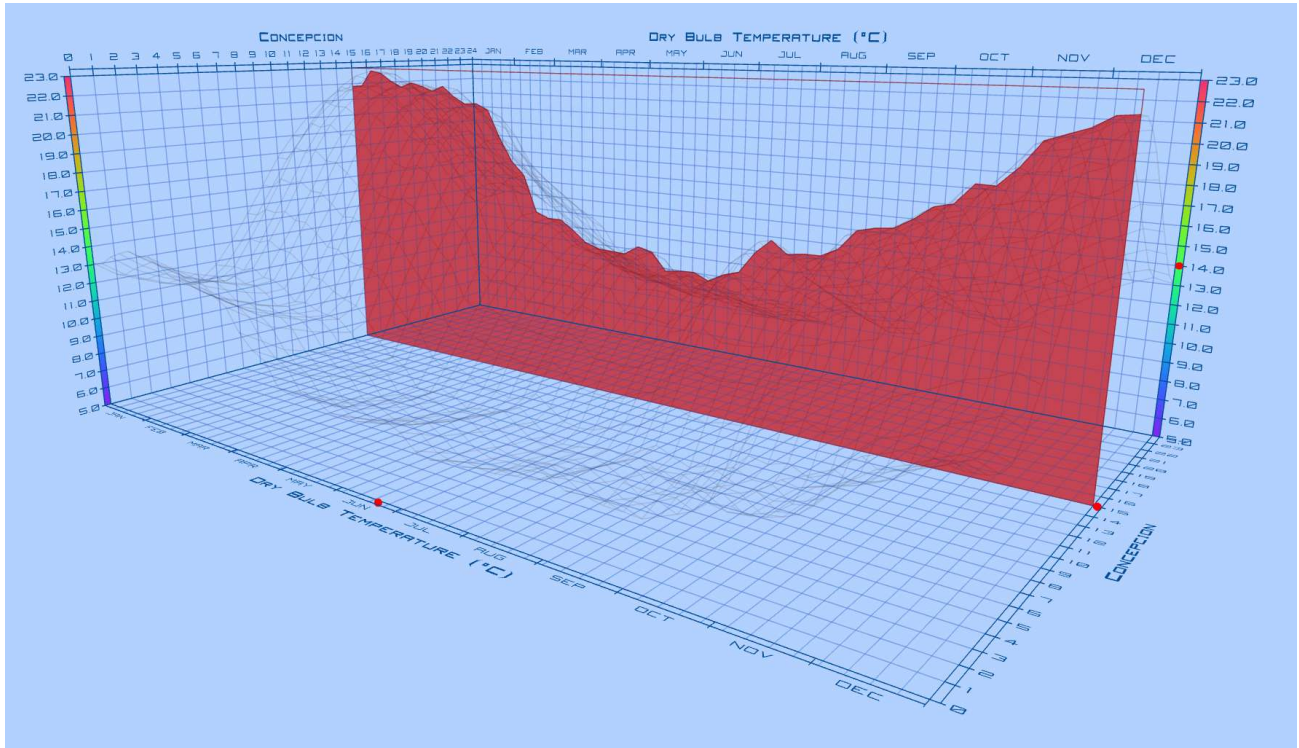


Figura 2.4. Perfil de temperaturas anuales a las 15:00 am.

La figura 2.5, muestra la carta psicrométrica con los porcentajes de las horas en estación estival, específicamente en el mes de Enero y las posibles estrategias que permitirían incrementar las horas de confort interior. Mientras que la figura 2.6, muestra la Carta Psicrométrica para el mes de Julio.

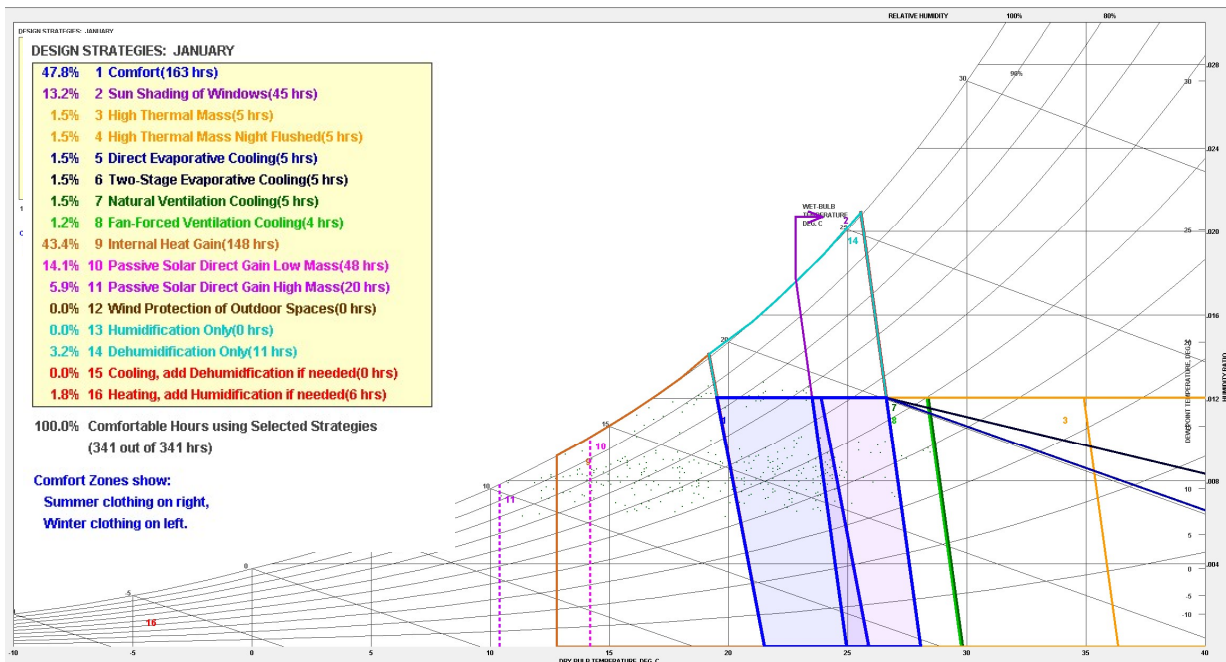


Figura 2.5. Carta Psicrométrica mes de Enero

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

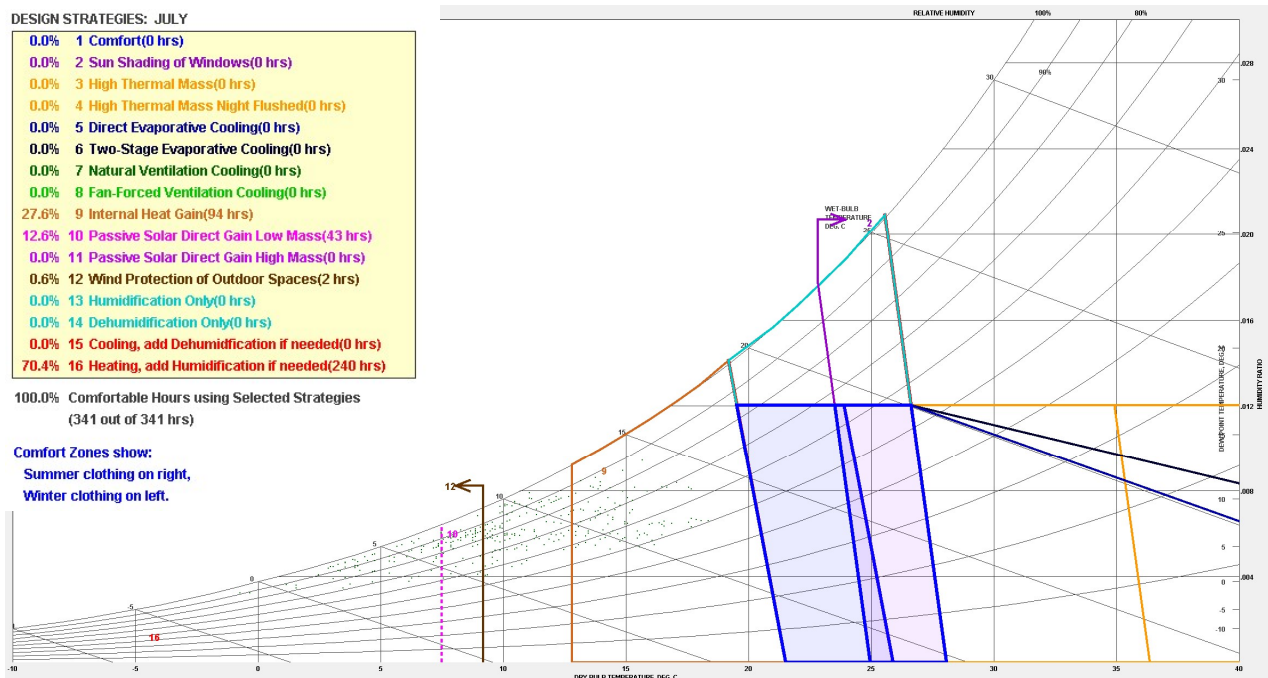


Figura 2.6. Carta Psicométrica mes de Julio

Del análisis de estas imágenes, obtenidas mediante software Climate Consultant 6.0, se puede visualizar que en el mes de Enero el 47.8% de las horas en que el edificio estaría en uso se encuentra dentro del rango de confort de manera pasiva. En ciertos horarios, se podría necesitar limitar la exposición solar ya que presenta una probabilidad del 13.8% de superar las temperaturas de confort. Alrededor del 5% requeriría una fuente de enfriamiento o sistema de ventilación que ayude a este fin, por lo que en un primer análisis se haría innecesario para esta zona contar con un equipo de enfriamiento, dada las pocas horas de uso que se requiere.

En cambio, para el mes de julio, se tiene que el 70% de las horas en el rango de confort, debe ser proporcionado por un sistema de calefacción activo, el resto por ganancias internas como personas, equipos eléctrico, iluminación, etc y un 16% proporcionado por ganancia solar directa en paramentos con baja masa térmica.

Los datos de clima obtenidos mediante software especialidad METEONORM, fueron con contrastados con los obtenidos de la plataforma online RETScreen Expert, como se puede ver en la Figura 2.7.

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

| | Unidad | Ubicación de datos meteorológicos | Ubicación de la instalación | Fuente |
|--|--------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Latitud | | -36.8 | -36.8 | |
| Longitud | | -73.1 | -73.1 | |
| Zona climática | | 4C - Mixto - Oceánico | | |
| Elevación | m | 148 | 29 | Suelo+NASA |
| Temperatura de diseño de la calefacción | °C | 2.6 | | Suelo - Mapa |
| Temperatura de diseño del aire acondicionado | °C | 23.2 | | Suelo |
| Amplitud de la temperatura del suelo | °C | 4.8 | | NASA |

| Mes | Temperatura del aire | Humedad relativa | Precipitación | Radiación solar diaria - horizontal | Presión atmosférica | Velocidad del Viento | Temperatura del suelo | Grados-días de calefacción 18 °C | Grados-días de refrigeración 10 °C |
|--------------|----------------------|------------------|---------------|-------------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| | °C | % | mm | kWh/m ² /d | kPa | m/s | °C | °C-d | °C-d |
| Enero | 16.3 | 75.1% | 10.54 | 6.96 | 101.8 | 4.8 | 17.3 | 53 | 195 |
| Febrero | 15.7 | 76.5% | 19.60 | 5.89 | 101.8 | 4.4 | 17.2 | 64 | 160 |
| Marzo | 13.9 | 80.3% | 26.35 | 4.63 | 101.9 | 3.8 | 16.1 | 127 | 121 |
| Abril | 12.0 | 83.2% | 64.80 | 3.05 | 102.0 | 3.4 | 13.9 | 180 | 60 |
| Mayo | 10.8 | 86.6% | 161.20 | 1.78 | 102.0 | 3.6 | 12.2 | 223 | 25 |
| Junio | 9.2 | 87.4% | 207.00 | 1.44 | 102.1 | 3.8 | 11.2 | 264 | 0 |
| Julio | 8.8 | 85.6% | 168.33 | 1.68 | 102.1 | 3.8 | 10.5 | 285 | 0 |
| Agosto | 9.1 | 84.6% | 140.12 | 2.47 | 102.2 | 3.8 | 10.6 | 276 | 0 |
| Setiembre | 9.7 | 82.3% | 78.60 | 3.66 | 102.2 | 3.8 | 11.4 | 249 | 0 |
| Octubre | 11.5 | 80.7% | 56.42 | 5.11 | 102.1 | 4.1 | 12.6 | 202 | 47 |
| Noviembre | 13.5 | 77.9% | 37.20 | 6.22 | 102.0 | 4.6 | 14.2 | 135 | 105 |
| Diciembre | 15.5 | 75.9% | 20.77 | 6.79 | 101.9 | 4.8 | 16.0 | 78 | 171 |
| Anual | 12.1 | 81.4% | 990.93 | 4.13 | 102.0 | 4.1 | 13.6 | 2,136 | 883 |
| Fuente | Suelo | Suelo | NASA | Suelo | Suelo | Suelo | NASA | Suelo | Suelo |
| Medido a | | | | | | m | | 10 | 0 |

Figura 2.7. Datos climáticos por mes – Concepción

2.3. La vivienda social en Chile

Para poder definir de manera objetiva a qué tipo de vivienda construida actualmente es considerara como “vivienda social”, primero de se debe recurrir a la definición que la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, que define en su Artículo 6.1.2 “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%”.

Por otro lado, como instrumento estatal que regula la construcción de viviendas, considerada del tipo social o económica, es el Decreto Supremo N°49 del año 2011 y que es modificado por el Decreto N°105 del 8 de septiembre de 2014, este decreto, regula el programa, conocido como “Programa Habitacional Fondo Solidario de Elección de Vivienda” que promueve el acceso a las familias que se encuentren en situación de vulnerabilidad a una vivienda que ejecutada por privados, obtengan una solución habitacional a través de un subsidio otorgado por el Estado. En este caso, es para aquellas familias que pertenezcan al 40% más vulnerable de la población nacional.

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

Aun cuando el valor del subsidio es variable y depende de varios factores como tanto económicos y de vulnerabilidad, también tiene valores diferenciados de acuerdo a la propiedad del terreno, según proyecto de densificación, condominios, etc. además de condiciones de localización, factibilización de terrenos y habilitación estructural, densificación en altura, equipamiento y espacio público, entre otros indicadores, como los del tipo familiar, como el número de integrantes, personas con discapacidad, ahorro adicional al mínimo exigido, por lo que en promedio para la zona de Concepción, el subsidio podría llegar a 600 UF y hasta 950 UF, esto de acuerdo al último llamado efectuado en Diciembre de 2021.

Este reglamento, indica en su capítulo IV, denominado “Estandar Técnico de los conjuntos habitacionales, de la vivienda y del equipamiento en los proyectos habitacionales”, que la superficie mínima a construir dependiendo el tipo de construcción, deberá ser la indicada en Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Superficie mínima a construir de acuerdo a tipología de vivienda (D.S. 105/08.09.2014)

| | Superficie Mínima |
|------------------------------|--------------------------|
| Construcción en sitio propio | 45 m ² |
| Densificación Predial | 42 m ² |
| Pequeño condominio | 42 m ² |
| Construcción Nuevos terrenos | 42 m ² |

Así mismo, se debe indicar que la normativa por la cual se rige este programa exige el cumplimiento del estándar técnico, estableciendo a través de una herramienta denominada Itemizado Técnico, que resulta ser un listado de materiales, especificaciones, equipos, entre otros elementos, que pueden ser integrados en los diversos proyectos, sin embargo, en cuanto a equipamiento a considerar, solo indica soluciones para agua caliente sanitaria, a través de la aplicación de tecnología de termo eléctrico, calefón, sistemas solares térmicos y además la posibilidad de proponer soluciones alternativas que deben ser aprobados por el ministerio en función de los costos asociados, capacidad, potencia, entre otros, por lo que el desafío es incluir en este Itemizado equipos de calefacción y/o enfriamiento, dependiendo la zona en estudio, dada la necesidad de climatización para lograr temperaturas de confort con el menos costo posible, minimizando los efectos sobre el ambiente.

Otro programa de financiamiento de viviendas, corresponde al reglamentado mediante el Decreto N°19, de Integración Social y Territorial, que si bien es para viviendas con un mayor valor,

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

los proyectos deben generar la integración social, por lo que se ejecutan unidades habitacionales con superficies que permiten acceder a familias con mayor vulnerabilidad y capacidad de pago y que dentro de su Itemizado técnico, permite la incorporación de equipamiento, además de la posibilidad de entregar alternativas de eficiencia energética al obtener mayor puntuación en la evaluación del proyecto si integra medidas de eficiencia energética, como por ejemplo, incorporar un mejoramiento de un 15% de la transmitancia térmica de la envolvente por sobre el estándar normativo vigente, u otras medidas activas que mediante una memoria de cálculo justifique su incorporación en el ahorro energético de las viviendas y/o espacios comunes, existiendo la posibilidad de incorporar equipos que vayan en ayuda a obtener temperaturas de confort al interior de las viviendas.

2.4. La vivienda Objeto

La selección de la vivienda propuesta para el análisis en los distintos escenarios debe por un lado contar con una superficie mínima que ya se encuentra definida en los instrumentos que regulan los distintos programas habitacionales y que el presente estudio, será la indicada en el D.S. N°49, dado que es el programa que financiando por privados y subsidiado por el Estado, permite la incorporación de elementos tecnológicos como sistemas de ventilación, calefacción, colectores solares, sistemas fotovoltaicos, entre otros, por lo que de acuerdo a la factibilidad técnico – económica, sería posible la incorporación de un sistema de calefacción de bomba de calor.

En Chile, hacia el año 2018, de acuerdo al Informe Final de Usos de la Energía de los Hogares, Chile 2018, financiado por el Ministerio de Energía (Yáñez, 2018), indica que a nivel nacional, un 38.3% corresponde a vivienda aislada, un 39.1% corresponde a vivienda pareada y el resto corresponde a viviendas del tipo departamento o en fila. Por otro lado, este mismo informe, indica que del total de las viviendas el 74.3% se presentan en un piso y el resto en dos o más pisos, mientras que respecto a la materialidad constructiva, el 48.3% de las viviendas corresponderían a albañilería, seguido con un 28.5% en tabiquería de madera.

De esta manera, la vivienda objeto de este estudio, será una vivienda especificada con muros de albañilería confinada, en un nivel, cuya envolvente cumpla las condiciones establecidas en el P.D.A del Gran Concepción, es decir, a lo menos 50 mm de poliestireno expandido de 20 kg/m³ de densidad, lo equivale a que el muro tenga una transmitancia térmica de 0.6 W/m²K.

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

En tanto, para la cubierta, se cumple el estándar PDA – Gran Concepción, con una transmitancia térmica $U=0.33 \text{ W/m}^2\text{K}$. Esto se logra, con 200 mm de lana de fibra de vidrio de 11 Kg/m^3 de densidad.

En cuanto a puertas y ventanas, esta se cumple mediante una Puerta de Madera Maciza lisa exterior, dimensiones 0,85mts de ancho x 2,0mts de alto y 0,045mts de espesor. Marco de puerta 30mm. Esta puerta cumple con una transmitancia térmica de $U=1.7 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ y en cuanto a la ventana especificada esta cumple el estándar mediante una transmitancia térmica de $3.7 \text{ W/m}^2\text{K}$, del tipo DVH con vidrios 3/6/3 con marco de aluminio.

En las siguientes imágenes se puede visualizar en detalle las características arquitectónicas de la vivienda objeto, la que fue tomada de un proyecto en desarrollo en la zona de estudio y cuenta con la calificación de vivienda social, perteneciente al programa habitacional del Ministerio de Vivienda.

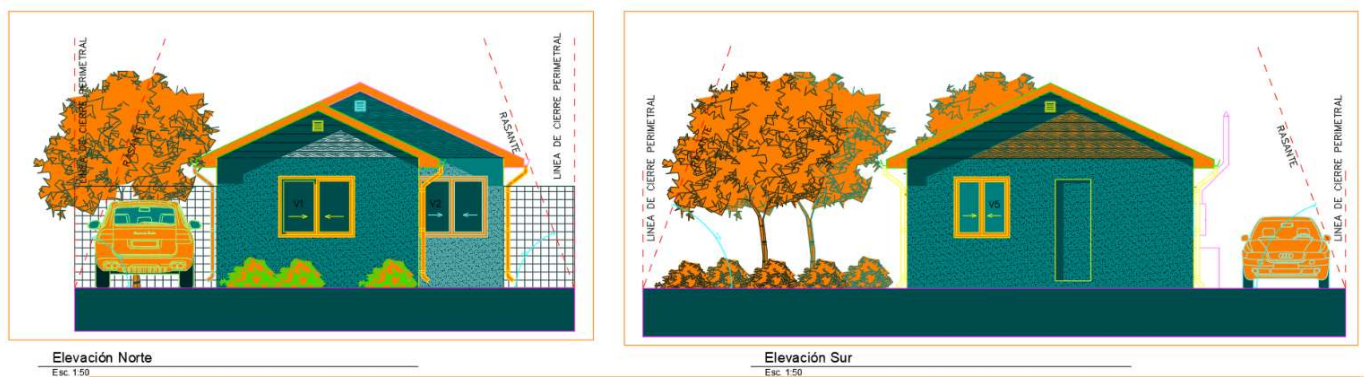


Figura 2.8. Elevación Norte y Sur - Vivienda Objeto

Capítulo 2. La Vivienda Objeto



Figura 2.9. Elevación Oeste y Este - Vivienda Objeto



Figura 2.10. Imagen renderizada - Vivienda objeto

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

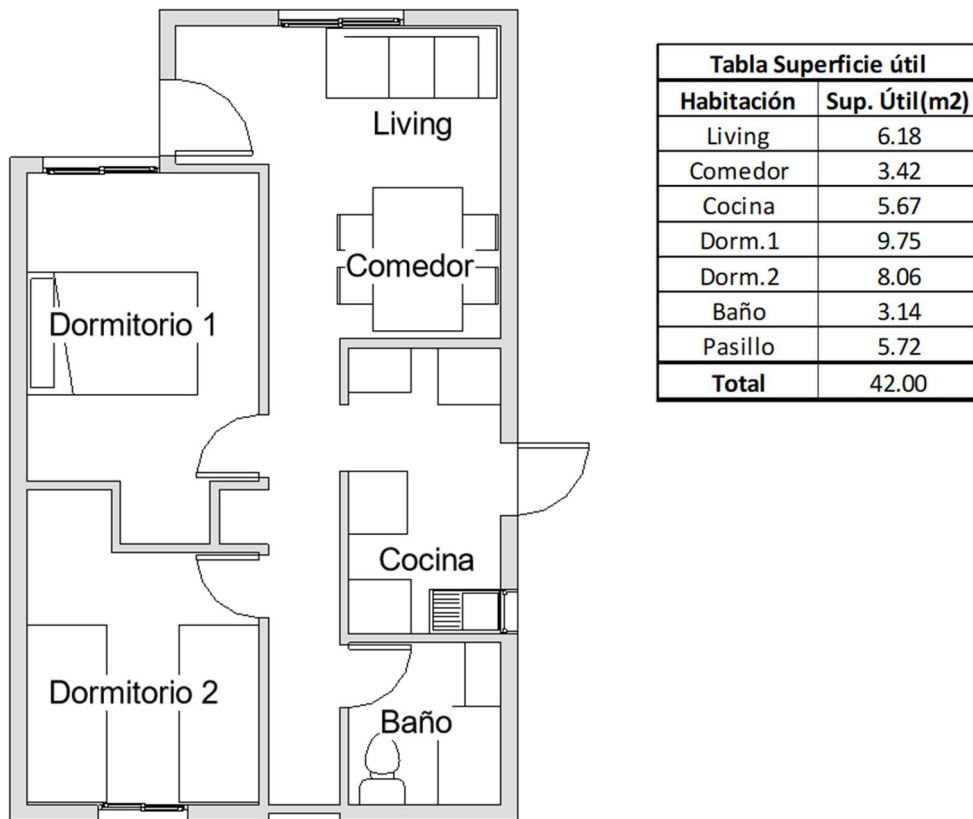


Figura 2.11. Planta de arquitectura y tabla superficie útil - Vivienda objeto

2.5. Escenarios de análisis

De acuerdo a la definición de la vivienda objeto, se definirán distintos escenarios posibles de reducir la demanda energética de la vivienda, de manera de poder especificar el sistema de calefacción mediante bomba de calor, que cumpliendo la demanda, posea la menor potencia disponible en el mercado.

Como ya se ha dicho, la vivienda objeto, se considerará el escenario 0, el que efectuando distintas modificaciones a la propuesta de envolvente, manteniendo la aislación de la techumbre y variando de acuerdo a los espesores comerciales de poliestireno expandido, además de efectuar trabajos en la hermeticidad de la envolvente, lo que permitiría reducir el indicador de 5 a 3 ren/h a 50 Pa.

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

Tabla 2.4. Definición de escenarios de acuerdo a transmitancia térmica de la envolvente

| Número | Escenario | Aislación Muro e (mm) | Vidrio U (W/m ² K) | Hermeticidad (Ach/h) a 50 Pa | Aislación Piso contra terreno (mm) |
|--------|-----------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--|
| 1 | 0 | 50 | 3.7 | 5 | Sin Aislación |
| 2 | 0.1 | 50 | 3.7 | 3 | Sin Aislación |
| 3 | 0.2 | 50 | 1.9 | 3 | Sin Aislación |
| 4 | 1 | 80 | 3.7 | 5 | Sin Aislación |
| 5 | 1.1 | 80 | 3.7 | 3 | Sin Aislación |
| 6 | 1.2 | 80 | 1.9 | 3 | Sin Aislación |
| 7 | 2 | 100 | 3.7 | 5 | Sin Aislación |
| 8 | 2.1 | 100 | 3.7 | 3 | Sin Aislación |
| 9 | 2.2 | 100 | 1.9 | 3 | Sin Aislación |
| 10 | 3 | 120 | 3.7 | 5 | Sin Aislación |
| 11 | 3.1 | 120 | 3.7 | 3 | Sin Aislación |
| 12 | 3.2 | 120 | 1.9 | 3 | Sin Aislación |
| 13 | 4 | 140 | 3.7 | 5 | Sin Aislación |
| 14 | 4.1 | 140 | 3.7 | 3 | Sin Aislación |
| 15 | 4.2 | 140 | 1.9 | 3 | Sin Aislación |

Con cada uno de estos escenarios planteados, se procederá a efectuar mediante simulación dinámica en software Design Builder, la demanda energética de calefacción y enfriamiento, además de la utilización del módulo específico de diseño de calefacción y enfriamiento, de forma de dimensionar la potencia que se requiere y compararlas con las que el mercado ofrece, para así estimar la factibilidad técnica económica de implementar estos equipos en viviendas sociales.

En la Tabla 2.5 se muestran los resultados que se obtuvieron en los distintos escenarios definidos, mediante simulaciones con Design Builder.

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

Tabla 2.5. Resumen de simulaciones para cada escenario establecido

| Propuesta | Demanda Enfriamiento (kW-h) | Demanda Calefacción (kW-h) | Total Demanda energética (kW-h) |
|-----------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 0 | 6.25 | 1967.56 | 1973.81 |
| 0.1 | 7.37 | 1713.09 | 1720.46 |
| 0.2 | 3.14 | 1676.93 | 1680.06 |
| 1 | 8.30 | 1602.59 | 1610.88 |
| 1.1 | 10.08 | 1357.84 | 1367.92 |
| 1.2 | 4.27 | 1313.38 | 1317.65 |
| 2 | 9.31 | 1471.93 | 1481.24 |
| 2.1 | 11.32 | 1232.65 | 1243.97 |
| 2.2 | 4.78 | 1185.55 | 1190.33 |
| 3 | 9.77 | 1406.86 | 1416.63 |
| 3.1 | 11.88 | 1170.09 | 1181.97 |
| 3.2 | 5.14 | 1120.97 | 1126.11 |
| 4 | 10.09 | 1355.29 | 1365.37 |
| 4.1 | 12.49 | 1120.53 | 1133.02 |
| 4.2 | 5.33 | 1070.54 | 1075.87 |

El análisis de factibilidad a realizar a través de herramientas como VAN y TIR, se efectuará para todos los escenarios de especificaciones técnicas, esto para 3 equipos propuestos con diferentes niveles de desempeño o rendimiento, lo cual trae consigo diferencias en los precios de provisión de los equipos, así como de instalación y mantenimientos en un rango de 15 años.

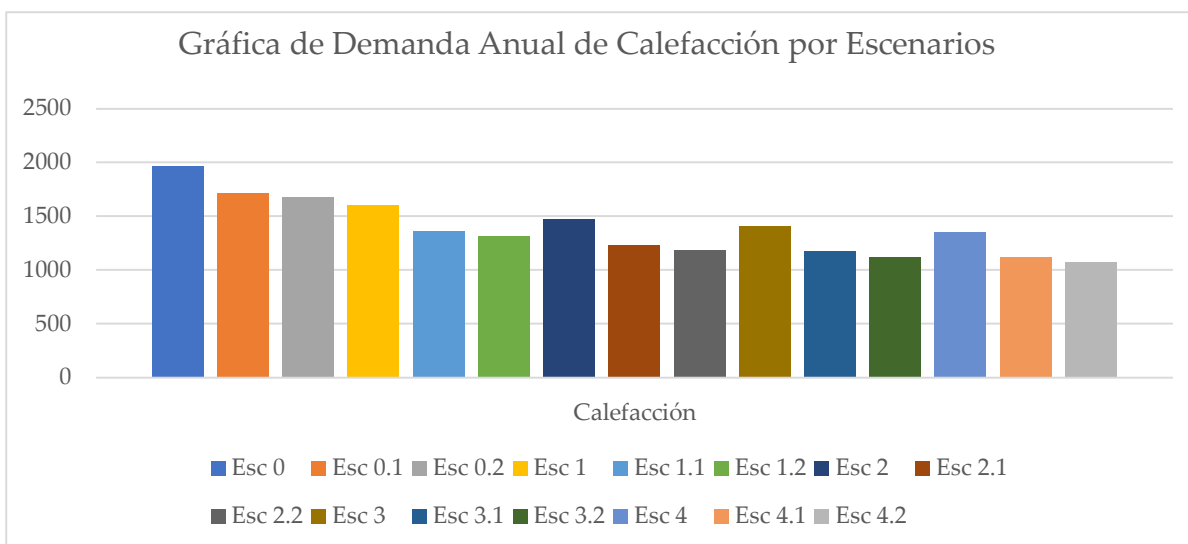


Gráfico 2.1. Suma anual de demanda de calefacción y enfriamiento

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

La tabla 2.7, muestra el requerimiento de potencia tanto para calefacción y refrigeración, así como la gráfica de tipo radial que muestra las potencias de acuerdo a cada escenario.

Tabla 2.6. Potencia requerida por Calefacción para cada escenario

| N° | Escenario | Calefacción (kW) |
|----|-----------|------------------|
| 1 | Esc 0 | 2.62 |
| 2 | Esc 0.1 | 2.49 |
| 3 | Esc 0.2 | 2.37 |
| 4 | Esc 1 | 2.39 |
| 5 | Esc 1.1 | 2.28 |
| 6 | Esc 1.2 | 2.14 |
| 7 | Esc 2 | 2.32 |
| 8 | Esc 2.1 | 2.2 |
| 9 | Esc 2.2 | 2.05 |
| 10 | Esc 3 | 2.28 |
| 11 | Esc 3.1 | 2.16 |
| 12 | Esc 3.2 | 2.01 |
| 13 | Esc 4 | 2.25 |
| 14 | Esc 4.1 | 2.13 |
| 15 | Esc 4.2 | 1.993 |

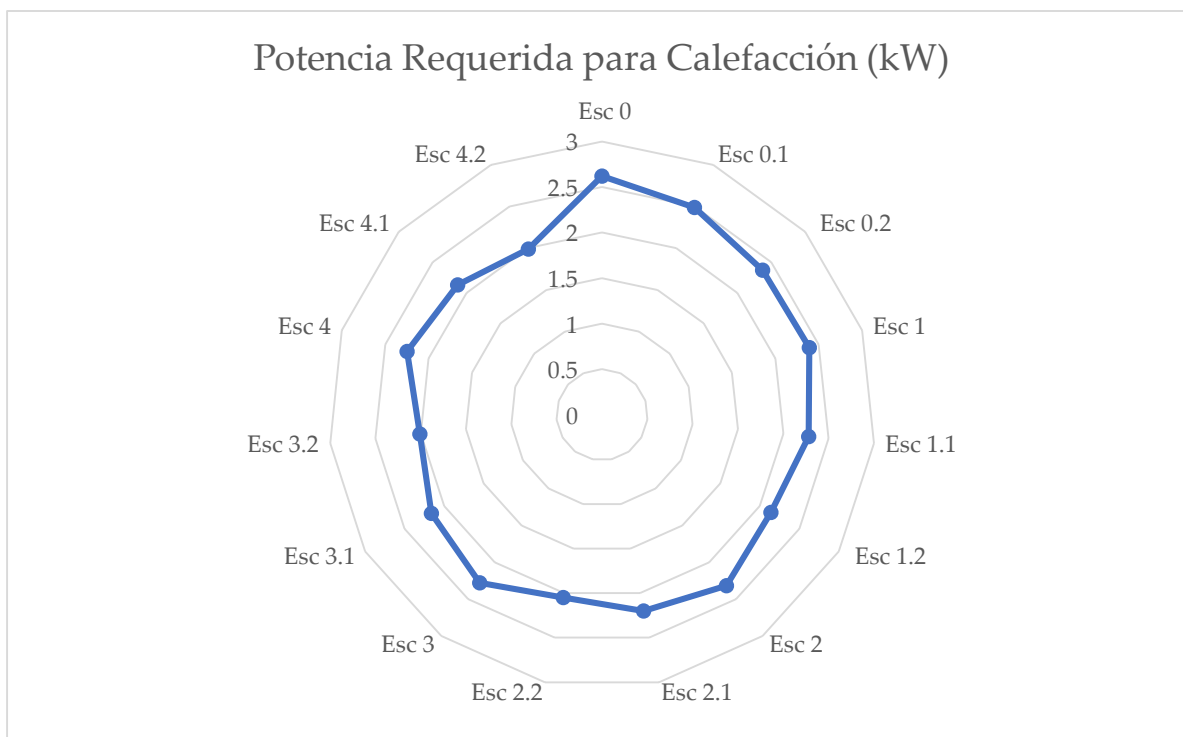


Gráfico 2.2. Potencia requerida de calefacción y refrigeración (kW) por escenario

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

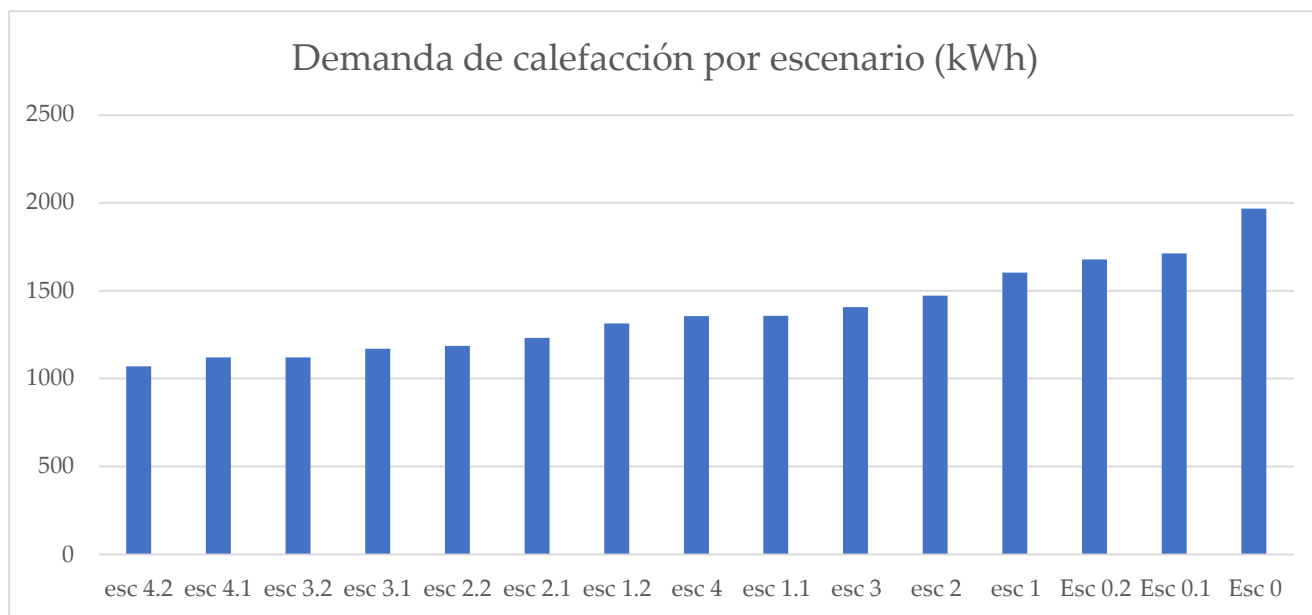


Gráfico 2.3. Ordenamiento de menor a mayor demanda de calefacción, enfriamiento y suma total

De acuerdo a los resultados de las simulaciones efectuadas, aquellos escenarios con una envolvente con mayor aislación presentan los mejores desempeños en cuanto a la disminución de la demanda energética para calefacción, logrando reducir hasta en un 45,5% en el Esc. 4.2, 40% en el Esc 3.1 y 25% en el Esc 2, por nombrar algunos, los que se pueden ver en la Tabla 2.7

Tabla 2.7. Resumen de simulaciones para cada escenario establecido

| N° | Escenario | Calefacción (kW) |
|----|-----------|------------------|
| 1 | Esc 0 | 0 |
| 2 | Esc 0.1 | 12.8% |
| 3 | Esc 0.2 | 14.9% |
| 5 | Esc 1 | 18.4% |
| 6 | Esc 1.1 | 30.7% |
| 7 | Esc 1.2 | 33.2% |
| 8 | Esc 2 | 25.0% |
| 9 | Esc 2.1 | 37.0% |
| 10 | Esc 2.2 | 39.7% |
| 11 | Esc 3 | 28.2% |
| 12 | Esc 3.1 | 40.1% |
| 13 | Esc 3.2 | 42.9% |
| 14 | Esc 4 | 30.8% |
| 15 | Esc 4.1 | 42.6% |
| 16 | Esc 4.2 | 45.5% |

Capítulo 2. La Vivienda Objeto

De esta forma, ya se tiene caracterizada la vivienda tipo y los distintos escenarios que serán analizados, donde fueron considerados tanto la demanda energética por calefacción y refrigeración, así como el dimensionamiento de los equipos para un día de referencia tanto de la estación invernal (15 de julio) y en verano (15 febrero), además de un factor de seguridad de 25% para calefacción, como se puede ver en la Tabla 2.7.

Capítulo 3. Bombas de calor

Capítulo 3. Bombas de calor

El presente capítulo, mostrará en primer lugar la teoría de funcionamiento de estas máquinas térmicas, basado su funcionamiento en la termodinámica que, a través de la contribución de trabajo mecánico, permiten transferir calor desde un entorno de baja temperatura a una región cuya temperatura es mayor. Estos equipos, por tanto son capaces de calentar espacios aprovechando el calor disponible de un medio exterior como aire, agua o tierra que está a una menor temperatura, y de manera opuesta, invirtiendo su ciclo de operación, de enfriar dichos espacios expulsando el calor a un medio de mayor temperatura. En la actualidad, existen diferentes configuraciones de bombas de calor que se emplean a nivel residencial, comercial e industrial, donde su propósito puede ser climatizar ambientes, producir agua caliente sanitaria o producir calor o frío de proceso según sea el área donde se implemente. Estos sistemas pueden configurarse además con otras soluciones como por ejemplo la energía distrital o sistemas fotovoltaicos y/o colectores solares como apoyo. Así mismo, se presentará los tipos de equipos que hoy ofrece el mercado para uso residencial.

Una bomba de calor opera en base a un ciclo termodinámico cerrado cuyo fluido de trabajo corresponde a un gas refrigerante. Este último, en efecto, lleva a cabo el transporte de calor desde el medio de menor temperatura a la zona que se encuentra a una temperatura superior a través de 4 procesos principales, los cuales se ilustran en la Figura 3.1

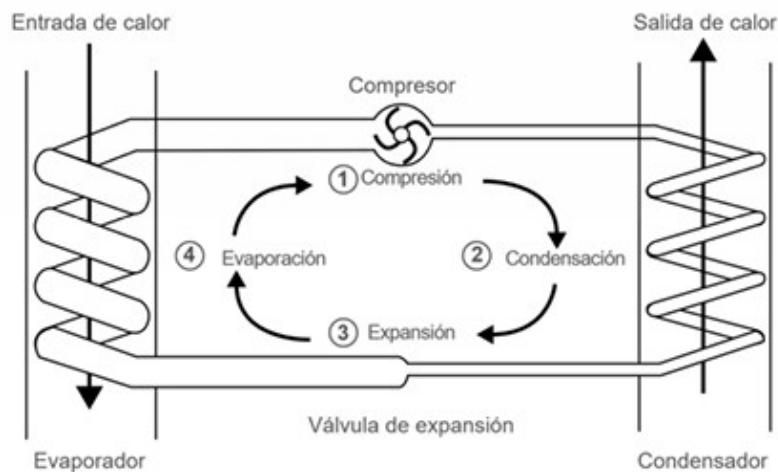


Figura 3.1. Esquema proceso mecánico

Capítulo 3. Bombas de calor

La bomba de calor tiene la capacidad de extraer y capturar energía de fuentes externas y gratuitas, es decir, sin la incorporación de más energía que los propios elementos del sistema posee. Esta característica hace que estos sistemas sean tan eficientes, ya que se consigue sumar a la potencia eléctrica de accionamiento del compresor, el calor absorbido en el evaporador, transportando así este calor útil al condensador, lo que proporciona entre 4 y 5 veces la potencia consumida al medio a calentar.

Los procesos que dan lugar al transporte de energía térmica en una bomba de calor:

- Compresión: proceso mediante el cual el gas refrigerante eleva su presión y temperatura a través de la contribución de trabajo mecánico.
- Condensación: proceso mediante el cual el gas refrigerante cede calor a la región de mayor temperatura. En esta etapa, el fluido ingresa como vapor sobrecalentado y sale como líquido subenfriado.
- Expansión: posterior al proceso de condensación, el gas refrigerante pasa a través de la válvula de expansión donde reduce su presión y temperatura. Posterior a esta etapa, el estado del refrigerante corresponde a una mezcla de líquido y vapor.
- Evaporación: proceso a través del cual el fluido refrigerante absorbe calor de la región de menor temperatura. Posterior a este proceso, el refrigerante se encuentra en estado de vapor sobrecalentado. Los procesos de condensación y evaporación se llevan a cabo en intercambiadores de calor que interactúan con los focos de mayor y menor temperatura, respectivamente. El proceso de expansión, mientras tanto, se realiza a través de una válvula reductora de presión. Por último, la etapa de compresión puede llevarse a cabo a través de un proceso mecánico donde se requiere un compresor eléctrico o a combustible, mediante un proceso térmico. Esto último hace distinguir por lo tanto dos tipos de bombas de calor según sea el mecanismo de compresión: los sistemas mecánicos y los sistemas térmicos o de absorción. Como su nombre lo indica, las bombas de calor por absorción implican la absorción de un refrigerante mediante un segundo fluido de trabajo, el cual recibe el nombre de fluido absorbente o de transporte. En el área de refrigeración, el sistema de absorción con mayor uso utiliza la mezcla amoníaco-agua, donde el amoníaco (NH) actúa como refrigerante y el agua corresponde al medio de transporte o absorbente.

Capítulo 3. Bombas de calor

Otras mezclas empleadas son las de agua-bromuro de litio y la de agua-cloruro de litio, en los que el agua sirve como refrigerante.

De esta forma, las bombas de calor son empleadas para poder climatizar todo tipo de recintos, generando calefacción o agua caliente sanitaria, aunque también hay bombas de calor que funcionan con un ciclo inverso, es decir, que extraen calor del local pasándola al agua sanitaria para calentarla gratuitamente, es decir, aire acondicionado. En esta caso estamos hablando de una bomba de calor reversible y por lo tanto, tienen la posibilidad de enfriar dichos recintos.

La ventaja de usar la bomba de calor reside en su capacidad de suministrar más energía útil, en forma de calor, de la que utiliza para su funcionamiento como lo es la energía eléctrica, pudiendo llegar a producir ahorros respecto a un sistema de calentamiento tradicional como gas, biomasa, electricidad directa o cualquier otro combustible. Esto permite derivar en otras ventajas del uso de las bombas de calor, a nivel medioambiental, ya que se deja emitir por ejemplo material particulado, CO₂, siendo más respetuosos con el medio.

3.1. Clasificación de bombas de calor

3.1.1. Según Focos de Transporte Térmico

Las bombas de calor pueden clasificarse en dos según sea la fuente de donde se extrae calor: por un lado, existen las bombas de calor que se clasifican como aerotérmicas debido a que extraen calor del aire ambiental; y, por otro lado, se encuentran los sistemas que extraen calor de la superficie y cuya denominación corresponde a bombas de calor geotérmicas. Tanto las bombas de calor aerotérmicas como geotérmicas pueden transportar dicha energía térmica a un medio que puede ser aire o agua, a partir de lo cual se obtiene la siguiente clasificación:

Bomba de calor aire - aire: el calor que se toma del el aire se transfiere directamente al aire del local que debe calentarse.

Bomba de calor aire - agua: el calor se toma del aire y se transfiere a un circuito de agua que abastecerá un suelo/techo radiante/refrescante, radiadores de baja temperatura, ventilo convectores (Split) o aerotermos o acumuladores de Agua Caliente Sanitaria (ACS).

Bomba de calor agua – agua: el sistema toma el calor de un circuito de agua en contacto con un elemento que le proporcionará el calor (la tierra, capa freática) para transferirlo a otro circuito de

Capítulo 3. Bombas de calor

agua como en el caso anterior. Es el sistema generalmente adoptado por las bombas de calor geotérmicas.

Bomba de calor geotérmica: este tipo de bombas de calor obtiene la energía del terreno a través de un fluido caloportador que absorbe el calor del suelo y lo transmite al circuito frigorífico de la bomba.

Bomba de calor aerotermia: este tipo de equipo es capaz de calentar o enfriar un ambiente como las bombas de calor aire-aire, calentar o refrescar un suelo radiante/refrescante e incluso calentar agua sanitaria (producir ACS).

A modo de ejemplo, para el caso de una vivienda se puede indicar que si se incorporara una bomba de calor del tipo aire – aire, esta tomaría el calor de aire exterior para entregárselo a esta mediante un intercambiador de aire, y si dicha vivienda tuviese suelo radiante sería de aire-agua, ya que el intercambio dentro de la vivienda se realizaría a través de dicho suelo radiante o equipos radiadores de pared. Por otro lado, si además el calor exterior es tomado del terreno bajo la vivienda, en lugar del aire exterior, tendríamos una bomba de calor agua-agua, pero en este caso con aprovechamiento de la energía geotérmica.

3.1.2. Según accionamiento

Asimismo, las bombas de calor pueden clasificarse según la fuente de energía que utiliza el compresor, la cual puede ser energía eléctrica o la que se obtiene producto de la combustión, siendo la primera la que tiene un mayor predominio en esta área. Respecto a la segunda clasificación, la tecnología más utilizada corresponde a la que opera en base a gas natural o gas licuado debido a su alta eficiencia de conversión en el proceso de combustión y cuya nomenclatura es GHP por sus siglas en inglés (Gas Heat Pump).

En la Figura 3.3 se ilustra el mecanismo de operación de una bomba de calor aerotérmica cuyo compresor se abastece de electricidad, donde se aprecia además que el propósito final de ésta es suministrar calefacción. Por otro lado, la Figura 3.4 ilustra el principio de funcionamiento de un sistema aerotérmico cuyo compresor opera en base a un motor a combustión, donde se observa que el suministro de calefacción utiliza adicionalmente el calor residual de los gases de escape. Las bombas de calor a gas al igual que los sistemas eléctricos pueden entregar los servicios de calefacción y refrigeración de ambientes y producción de agua caliente sanitaria; además, pueden

Capítulo 3. Bombas de calor

ser implementadas a nivel residencial, comercial e industrial donde se utilizarán preferentemente en áreas donde el costo de compra del combustible sea inferior al costo asociado al consumo eléctrico. Se caracterizan además por operar con un consumo eléctrico mucho menor que en las bombas de calor eléctricas ya que solo se requiere de esta fuente de energía para dar lugar a los procesos de ventilación y de control.

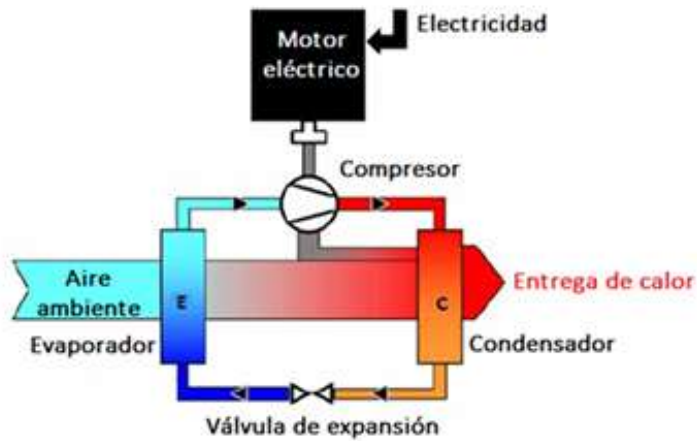


Figura 3.2. Descripción sistema alimentado mediante electricidad

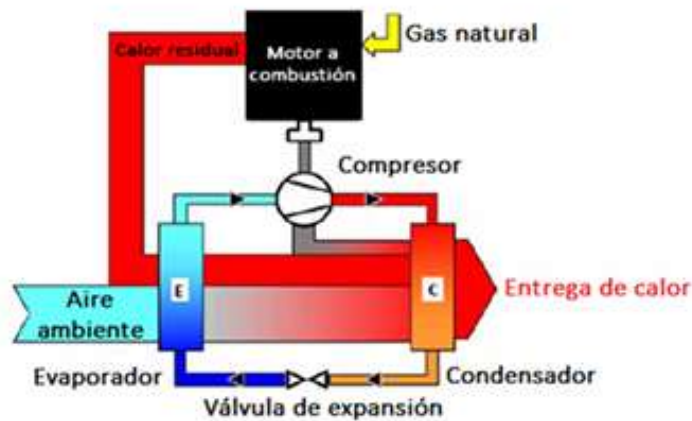


Figura 3.3. Descripción sistema alimentado mediante combustión a gas natural (Fuente: IDAE – España)

3.1.3. Según Reversibilidad

Capítulo 3. Bombas de calor

Las bombas de calor pueden clasificarse en sistemas reversibles y no reversibles, donde, la entrega única de calefacción o entrega única de refrigeración corresponde a sistemas no reversibles, y, el suministro de calefacción o refrigeración según sea la estación del año, corresponde a bombas de calor reversibles. Estas últimas, cuentan con un dispositivo auxiliar al interior del circuito interno denominado válvula de cuatro vías, gracias a la cual es posible revertir la función en estos equipos. Adicionalmente, con esta válvula es posible llevar a cabo el proceso de descongelamiento del ciclo térmico. La Figura 3.5 muestra el mecanismo de operación de un equipo reversible.

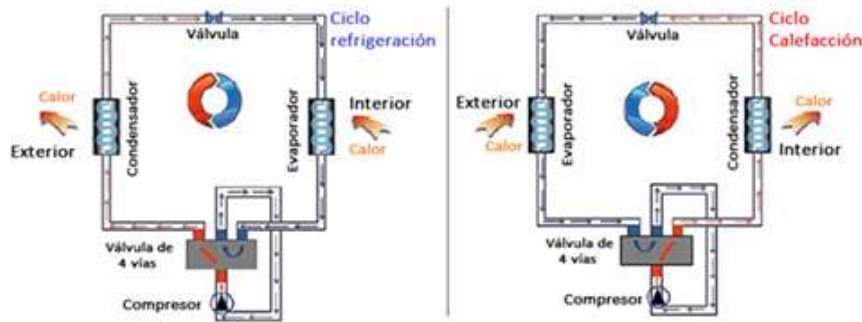
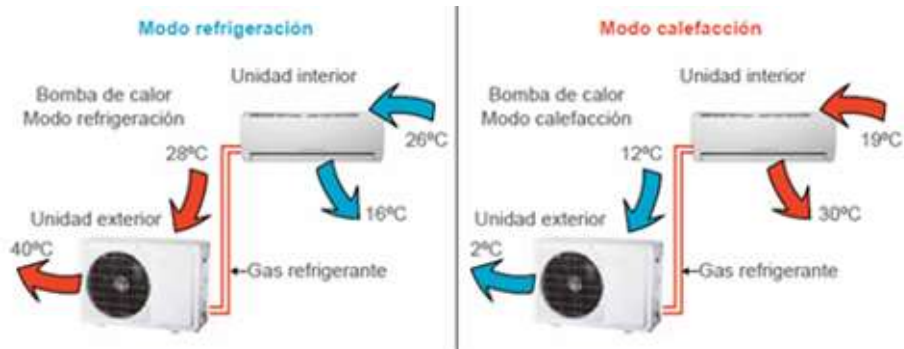


Figura 3.4. Descripción sistema interno bomba de calor reversible (Fuente: IDAE – España)

En la Figura 3.6 se ilustra el funcionamiento de una bomba de calor reversible desde el punto de vista del usuario. En modo refrigeración, la unidad interior actúa como evaporador donde retira calor de la habitación y, la unidad exterior actúa como condensador donde se cede calor al ambiente exterior. Por el contrario, en modo calefacción la unidad interior corresponde al condensador donde se libera calor al espacio interior, y la unidad exterior corresponde al evaporador a partir del cual se absorbe calor del aire exterior.



Capítulo 3. Bombas de calor

Figura 3.5. Descripción sistema interno bomba de calor reversible (Fuente: IDAE – España)

3.2. Eficiencia

La eficiencia de una bomba de calor, en modo calefacción, se mide a través del coeficiente de rendimiento COP (Coefficient of performance), el cual se define como el cociente entre la energía térmica cedida por el sistema (Q_{cal}) y la energía eléctrica consumida por el compresor (W_{comp}) con el equipo térmico a plena carga.

Ecuación 3.1. Coeficiente de rendimiento COP – Modo calefacción

$$COP = \frac{Q_{cal}}{W_{comp}}$$

En modo refrigeración, la eficiencia de la bomba de calor se mide a través del EER (Energy Efficiency Rating), la cual corresponde al cociente entre la energía térmica absorbida por el sistema (Q_{ref}) y el consumo eléctrico generado por el compresor (W_{comp}) en condiciones específicas de temperatura y en operación a plena capacidad.

Ecuación 3.2. Calificación rendimiento energético – Modo enfriamiento

$$EER = \frac{Q_{cal}}{W_{comp}}$$

Que una bomba de calor ofrezca un COP = 4 significa que por cada kW de potencia eléctrica consumida la potencia térmica emitida es de 4 kW. Sería una caldera de un 400% de rendimiento.

A modo de ejemplo, el equipo de la marca Midea, modelo V7W/D2N1, indica en su catálogo técnico que para modo calefacción en condiciones que el aire del evaporador se encuentra a 7 °C y 85%HR, y el agua del condensador se encuentra a 30/35° (entrada/salida). Esto de acuerdo a la figura 3.6, en que se indica que a esas condiciones ofrece una potencia de 6.55 kW térmicos, absorbiendo una potencia eléctrica de 1,45 kW, es decir, un COP de 4.52.

Capítulo 3. Bombas de calor

| MHC- Mono Exterior | | | V5W/D2N1 | V7W/D2N1 | V10W/D2N1 | V12W/D2N1 | V14W/D2N1 | V16W/D2N1 | V12W/D2RN1 | V14W/D2RN1 | V16W/D2RN1 |
|---------------------------|-----------------|---------|--------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|------------|------------|
| Fuente de alimentación | | V/Ph/Hz | 220-240/1/50 | | | | | | 380-415/3/50 | | |
| Calefacción ¹ | Capacidad | kW | 4,58 | 6,55 | 10,43 | 12,17 | 14,76 | 16,33 | 12,37 | 14,10 | 16,30 |
| | Entrada nominal | kW | 0,97 | 1,45 | 2,28 | 2,73 | 3,40 | 3,90 | 2,76 | 3,26 | 3,88 |
| | COP | | 4,72 | 4,52 | 4,57 | 4,46 | 4,34 | 4,19 | 4,48 | 4,33 | 4,20 |
| Calefacción ² | Capacidad | kW | 4,67 | 6,69 | 10,17 | 12,58 | 14,08 | 16,12 | 12,02 | 14,11 | 16,06 |
| | Entrada nominal | kW | 1,43 | 2,05 | 3,08 | 3,86 | 4,47 | 5,22 | 3,72 | 4,47 | 5,23 |
| | COP | | 3,27 | 3,26 | 3,30 | 3,26 | 3,15 | 3,09 | 3,23 | 3,16 | 3,07 |
| Enfriamiento ³ | Capacidad | kW | 4,55 | 6,45 | 10,25 | 12,19 | 14,61 | 14,82 | 12,64 | 14,03 | 15,10 |
| | Entrada nominal | kW | 1,00 | 1,47 | 2,06 | 2,65 | 3,32 | 3,66 | 2,75 | 3,26 | 3,78 |
| | EER | | 4,55 | 4,40 | 4,98 | 4,60 | 4,40 | 4,05 | 4,60 | 4,30 | 4,00 |
| Enfriamiento ⁴ | Capacidad | kW | 4,55 | 6,71 | 10,44 | 12,21 | 12,95 | 13,72 | 12,58 | 13,80 | 15,26 |
| | Entrada nominal | kW | 1,55 | 2,57 | 3,28 | 4,17 | 4,53 | 5,16 | 4,32 | 5,15 | 6,41 |
| | EER | | 2,94 | 2,61 | 3,18 | 2,93 | 2,86 | 2,66 | 2,91 | 2,68 | 2,38 |

Figura 3.6. Especificaciones Bomba de Calor marca MIDEA

3.3. Tipología de equipos para sistema de Bombas de Calor por Aerotermia

El presente estudio, se centrará en estudiar la factibilidad de incorporación de bombas del tipo aerotermia en las viviendas de carácter social, ya que son más sencillas tanto en su funcionamiento como en su ejecución en cuanto a costos, como por ejemplo las del tipo geotérmicas. Y como ya se ha indicado, este tipo de bombas de calor aerotermias son aquellas en que el medio utilizado para acondicionarlo térmicamente ya sea calentando o enfriando es el aire exterior. En el caso de que se utilice para calentar un medio, material o fluido, significa que se está extrayendo calor del aire, y en el caso de que se esté enfriando, el calor extraído se libera al aire exterior.

De acuerdo al estudio realizado por GIZ “Energías Renovables para Autoconsumo”, que sirvió de base para efectuar un estudio de mercado de las bombas de calor disponibles en Chile el año 2019 y 2020, indica que las tecnologías más utilizadas actualmente hoy en el país corresponden a:

- Equipos Split
- Bombas de Calor Compactas para ACS
- Bombas de Calor Reversibles para Clima y ACS
- Bombas de Calor Industriales para Generación de Calor

3.3.1. Equipos para aerotermia – unidades compactas y exteriores

Capítulo 3. Bombas de calor

Los Equipos Split, son un sistema de bombas de calor, utilizado para climatizar ambientes, principalmente para aplicaciones residenciales y en algunos casos comerciales. Están equipados de un ventilador, los sistemas de calefacción y/o refrigeración pudiendo incorporar también un filtro de aire. Estos dispositivos tienen la característica de ser sistemas fragmentados, ya que cuentan con una unidad interior que se instala en el espacio que se quiere climatizar, y una unidad exterior en una zona donde se pueda realizar el intercambio de calor con el aire ambiente. Este es un caso de bomba de calor del tipo aire – aire.

Estos equipos se pueden instalar en ventanas o muros y pueden llegar a ser autocontenidos o portátiles y para requerimientos mayores se pueden configurar sistemas de unidades separadas múltiples o multi Split, y con distintas tecnologías como roof top o VRV por ejemplo.

En el caso de los equipos de muros o ventanas, idealmente para recintos pequeños u oficinas o viviendas, se conforman solo de una unidad interactuando al mismo tiempo entre el espacio interior y exterior. Como ventajas en su uso, se puede indicar que al ser unidades separadas, es posible independizar distintos sectores o plantas de viviendas o edificios, controladas manualmente y con un bajo costo de instalación ya que incluso permite realizarlo una vez terminadas las obras o en viviendas en uso.

Dentro de sus desventajas, se puede indicar que aunque funcionan con aire, no incorporan aire nuevo al recinto acondicionado ya que solo hacen recircular el aire del mismo, además con un alcance reducido en la distribución del aire. Presenta altos niveles de ruido en el ventilador, sobre todo cuando se requiere enfriar o calentar un espacio de manera rápida. Por otro lado, al generar agua en el proceso de condensado, presenta dificultades para evacuar el agua de condensación. Estos equipos no permiten la tecnología VRV (Volumen refrigerante variable).



Figura 3.7. Equipo de ventana.

Capítulo 3. Bombas de calor

A diferencia de los equipos de ventana, los sistemas tipo Split están divididos en dos unidades: una unidad dispuesta en el exterior y la otra en el interior. La unidad exterior está compuesta por el sistema de compresión, el condensador (modo refrigeración), un ventilador y el dispositivo de expansión. Con relación a la unidad interior, esta se constituye de un filtro de aire, el evaporador y ventilador. En el caso de una bomba de calor reversible, en modo calefacción la unidad interior actúa como condensador y la unidad exterior como evaporador. Estas unidades se encuentran conectadas por cañerías que conducen el fluido refrigerante, además de las correspondientes conexiones eléctricas.

Dentro de sus ventajas se pueden indicar, un bajo costos de instalación, la posibilidad de sectorizar por recintos o habitaciones, bajo nivel de ruido.

Mientras que como desventajas, se puede mencionar, el alcance reducido d impulsión de aire, baja cumplimiento en cuanto a requerimientos térmicos y tampoco incorporan aire nuevo a los recintos, ya que solo efectúan la recirculación de este.



Figura 3.8. Unidades exterior e interior de un sistema de bomba de calor tipo split .

Una variación de este tipo de sistema, lo constituyen los sistemas multi-split, ya que permiten incorporar a la unidad exterior, no solo una unidad interior sino que de dos a 5 o más si el fabricante permite mayores configuraciones. La unidad exterior está compuesta por un compresor, condensador, ventilador para la refrigeración del condensador y el dispositivo de expansión. Por otro lado, las unidades dispuestas en el interior de los recintos, comúnmente, llevan filtro de aire, el

Capítulo 3. Bombas de calor

evaporador (serpentín de refrigeración) y ventilador de impulsión. Este tipo de sistema es adecuado para pequeños conjuntos de locales que requieren independencia de funcionamiento y condiciones de aire específicas, por ejemplo, viviendas, grupos de oficinas (no más de cinco), etc.

Las ventajas de este tipo de equipos son similares al sistema Split unitario, sin embargo, todo se efectúa con una sola unidad exterior que alimenta a las unidades interiores de manera independiente, permitiendo una buena distribución del aire en el caso de utilizar unidades con conductos y bajo nivel de ruido.

Las desventajas igualmente, estos equipos presentan un reducido alcance cuando no se efectúan con conductos y poca satisfacción a los requerimientos térmicos y tampoco incorporan aire fresco a los recintos, solo permiten la recirculación del aire.

Por otra parte, el mercado hace muy poco tiempo, comenzó a ofrecer otro tipo de configuraciones que en general son usados para enfriamiento no siendo de uso exclusivo para ese fin, y que corresponde a los equipos portátiles son sistemas de aire acondicionado compactos que incluso pueden desplazarse por el interior de las viviendas u oficinas. Aunque presenta algunas incomodidades, ya que de todas maneras se debe tener contacto con el exterior para efectuar el intercambio térmico, deben disponer de un conducto que permita extraer el calor del aire exterior (o depositar aire frío), llevando a cabo el proceso de intercambio térmico para calefaccionar el hogar o refrigerar.

Aun así, estos equipos presentan ventajas como el no tener que efectuar una instalación y su sencillo uso y mantenimiento. Sin embargo, presenta desventajas como una baja capacidad de impulsión de aire, altos niveles de ruido y potencias bajas lo que limita su uso y eficacia. Un modelo de este tipo de equipo se puede ver en la siguiente figura 3.9

Capítulo 3. Bombas de calor



Figura 3.9. Equipo portátil de aire acondicionado .

Los equipos del tipo autocontenidos o autónomos están basados en el mismo principio de los equipos de ventana, es decir, todo en uno. Están compuestos generalmente de un compresor, filtro de aire, ventiladores, batería de calor auxiliar (calefactores eléctricos o a gas), condensador, evaporador y dispositivo de expansión. Todo esto, contenido en la misma unidad. Por lo general, en la parte baja de esta última se encuentra el compresor y el condensador y en la parte superior se encuentran la batería de calor auxiliar, el serpentín de refrigeración (evaporador) y los ventiladores. El funcionamiento de estos equipos se basa en que, la mezcla de aire exterior con aire de recirculación se limpia en el filtro, pasando posteriormente a través del evaporador donde disminuye su temperatura; luego, el ventilador aspira este aire frío y lo impulsa al habitáculo en forma directa. Para el caso de una bomba de calor reversible configurada en modo calefacción, el evaporador actúa como condensador.

Los equipos autocontenidos, presentan ventajas considerables como su bajo costo de instalación y tal vez la más importante y diferenciadora, es que permite la entrada de aire exterior, ayudando a la ventilación de los recintos a refrigerar o calefaccionar. Y su desventaja más importante es que resultan demasiado ruidosos cuando se colocan dentro del mismo espacio interior. Es importante de indicar que su instalación requiere de la incorporación de salida y retorno de aire hacia el recinto a climatizar, además de la salida y entrada de aire al condensador desde el exterior.

Una variación de estos equipos autocontenidos, son los denominados Roof Top son equipos compactos que contienen en su interior todos los elementos asociados a un circuito frigorífico, incluyendo una unidad de tratamiento de aire. Se diferencian de los autocontenidos en que estos

Capítulo 3. Bombas de calor

últimos permiten distribuir a través de conductos el aire acondicionado a diferentes locales interiores. En efecto, estos sistemas son apropiados para locales de grandes dimensiones y que requieran de aire en iguales condiciones de humedad y temperatura. Estos equipos presentan buenos desempeños en configuraciones de capacidad media y alta potencias desde los 17 kW a 100 kW para los de media y hasta 420 kW para alta demanda de refrigeración y/o calefacción.

Últimamente, el desarrollo de la climatización ha llevado a un incremento de los equipos conocidos como sistemas de volumen de refrigerante variable, la cual permite entregar el suministro de calefacción o refrigeración en función de la demanda térmica que haya en la zona climatizada. El principio de operación de esta tecnología se basa en un proceso de expansión directa del refrigerante cuyo flujo másico es controlado a partir de la regulación de la frecuencia de operación del compresor. Así, el compresor opera a menor o mayor rendimiento dependiendo de las demandas energéticas de cada unidad interior. Con esto se consigue que el compresor reduzca las marchas y los paros que son los causantes de desgaste de este. La variación del caudal de refrigerante en estos equipos, al igual que en los sistemas individuales, se lleva a cabo con la tecnología Inverter en los compresores, y adicionalmente, con el uso de válvulas de expansión electrónicas o válvulas de modulación de impulsos, incorporadas en las unidades interiores. Un aspecto relevante que se consigue con los sistemas VRV es la independencia climática en cada dependencia; cada unidad interior trabaja de forma independiente de las demás donde las válvulas de expansión electrónicas dejan pasar la cantidad de fluido refrigerante requerido para cada una de ellas.

Por otro lado, con estos sistemas se controla la temperatura localmente, lo cual lo hace adecuados para instalarlos en aquellas dependencias que se caracterizan por presentar requerimientos térmicos diferentes generados por fluctuaciones de cargas térmicas, de no simultaneidad de uso, etc. El suministro de calefacción y frío simultáneos en esta tecnología se lleva a cabo a través de un sistema a cuatro tubos, lo cual permite que haya un circuito de frío con dos tubos y de calor con los otros dos tubos restantes.

Para grandes superficies y distintos usos, ya de índole institucional como oficinas, colegios, dependencias de salud, estos equipos presentan ventajas relevantes, ya que por un lado, no requiere grandes espacios para la instalación de conductos ni equipos, permitiendo flexibilidad total para zonificación y regulación dependiendo de los distintos usos de las dependencias,

Capítulo 3. Bombas de calor

pudiendo controlar totalmente de maneja electrónica y con alto desempeño energético y de eficiencia.

3.3.2. Unidades interiores en Sistemas Aire-Aire

Las unidades interiores corresponden a los equipos que el usuario visualiza en las habitaciones o recintos a calefaccionar o refrigerar en los sistemas Split, Multi-Split y sistema VRV. Tanto la unidad interior como la exterior, conforman un sistema de expansión directa, donde el aire a acondicionar toma contacto de forma directa con el ciclo frigorífico que integra cada dispositivo.

A continuación se muestran los equipos interiores que el mercado ofrece actualmente, y que puede ser configurado para equipos aire – aire.

- **Unidad techo-suelo:** La unidad interior se instala en el suelo o techo a partir del cual se distribuye el aire acondicionado.

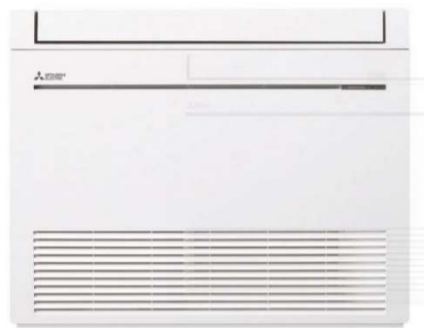


Figura 3.10. Modelo de equipo interior del tipo suelo - techo

Unidad tipo cassette: La unidad interior se instala en el techo falso de tal forma que el aire acondicionado se distribuye de manera vertical y horizontal en el recinto a climatizar.



Capítulo 3. Bombas de calor

Figura 3.11. Modelo de equipo interior del cassette

Unidad de conducto: En general, estas unidades interiores se disponen en el techo falso y van conectadas a conductos por los cuales se distribuye el aire acondicionado. Se trata de un sistema centralizado de climatización, que distribuye el aire por toda la vivienda a través de un falso techo y rejillas o aireadores. Algunos modelos permiten regular e incluso programar las rejillas que dan a cada habitación o estancia de la casa, según las necesidades de ese momento. Por ejemplo, si solo interesa climatizar el salón y la cocina, es posible cerrar temporalmente las rejillas que dan a las habitaciones, pudiendo proveer aire frío o caliente dependiendo de la estación del año.



Figura 3.12 Modelo de equipo interior para conductos

Unidad de pared: Estas unidades se instalan en el muro del recinto, y corresponden a los sistemas de mayor uso.



Figura 3.13. Modelo de equipo interior tipo Split de pared

Capítulo 3. Bombas de calor

3.3.3. Tipos de bombas Aire-Agua

Un sistema aire-agua corresponde a un equipo centralizado que se utiliza en el área de climatización para suministrar calefacción, refrigeración, y también para la producción de agua caliente sanitaria (ACS). En estos, se utiliza agua como fluido intermedio para realizar el transporte térmico entre la zona a climatizar y el refrigerante correspondiente al ciclo frigorífico. Generalmente, las bombas de calor aire-agua son empleadas para climatizar grandes edificios residenciales y comercios. A nivel doméstico, existen equipos que tienen la funcionalidad de generar calefacción o refrigeración y además generar agua caliente sanitaria.

- **Chiller Convencional:** En edificios, frecuentemente se utilizan calderas para la producción de agua caliente con la cual se da suministro de calefacción y producción de ACS a las distintas zonas interiores. Por otro lado, la producción de aire frío se lleva a cabo a través de Chillers que operan en conjunto con sistemas de distribución de aire tales como UMAs (unidades manejadoras de aire o unidades de tratamiento de aire) o por medio de fancoils o ventiloconvectores.
- **Generación de agua fría:** La producción de agua fría se lleva a cabo a través del siguiente mecanismo de operación: el agua de retorno procedente de las dependencias del edificio ingresa al Chiller, transfiriendo posteriormente parte de su energía térmica al refrigerante que circula por el evaporador que integra el ciclo frigorífico. En este transporte térmico, el agua reduce su temperatura hasta el valor requerido, ingresando nuevamente al circuito de distribución. Respecto al proceso de condensación del agua que opera en el interior de la máquina frigorífica, este se lleva a cabo a través de una torre de enfriamiento o a través del proceso de condensación de aire.
- **Bombas de Calor para Producción de agua caliente sanitaria:** En general, producción de agua caliente sanitaria a nivel domiciliario se lleva a cabo en un sistema compacto mediante la transferencia térmica entre el flujo de refrigerante que opera en la bomba de calor y el agua contenida en el estanque de almacenamiento integrado a dicho sistema (Figura 27). La temperatura que alcanza el flujo de agua procedente de la bomba de calor puede ir de los 45 a 60°C. Asimismo, existen sistemas donde el estanque de almacenamiento corresponde a un sistema separado de la bomba de calor. En este formato, el fluido refrigerante transfiere su energía térmica al flujo de agua que participa en un circuito intermedio, donde dicho

Capítulo 3. Bombas de calor

flujo posteriormente transfiere calor al agua contenida en el acumulador. Cabe mencionar que el sistema señalado en la ilustración corresponde a una bomba de calor para producción de ACS, la cual además suministra calefacción a través de un circuito de suelo radiante.



Figura 3.14. Bomba de calor compacta para agua caliente sanitaria (IDAE)

3.3.4. Unidades interiores sistemas aire – agua

- **Radiadores y Suelo radiante:** A diferencia de los sistemas aire-aire, con las bombas de calor aire-agua se pueden climatizar ambientes a través de radiadores y piso radiante o refrescante. En los radiadores, la temperatura promedio de operación del agua corresponde a 55°C a 60°C con la cual se entrega calor al interior a través de un proceso de convección natural. Respecto al piso radiante, la temperatura del agua caliente que ingresa a las tuberías instaladas en la parte baja oscila en torno a los 35°C en modo calefacción, y de 18 a 23°C en modo refrigeración (suelo refrescante).



Figura 3.15. Modelo de radiador (IDAE)

Capítulo 3. Bombas de calor

Por lo general, el uso de radiadores y suelo radiante que operan en base a una bomba de calor se utilizan a nivel residencial. Con esta última, además, es posible producir agua caliente sanitaria de manera independiente a partir del mismo sistema, e implementar el servicio de climatización a través de fancoils. Estos equipos corresponden a equipos multitarea o polivalentes.

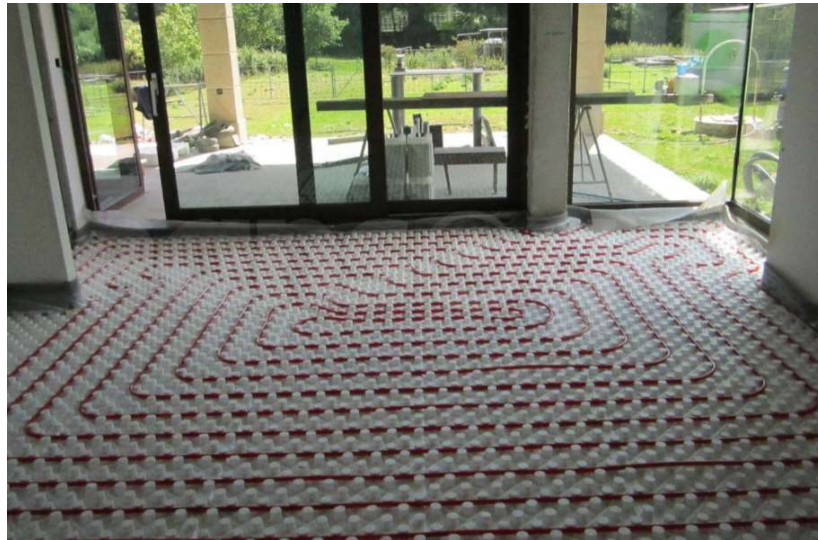


Figura 3.16. Piso radiante (IDAE)

- **Cielos Radiativos:** Las unidades terminales integradas a nivel de techo pertenecen a los sistemas radiativos de climatización, de igual manera que los radiadores y la inducción por piso radiante o refrescante. Estas unidades se constituyen por una red de tuberías instaladas en el techo del habitáculo a climatizar y por las cuales circula el flujo de agua caliente o fría proveniente de la bomba de calor. La instalación de estas unidades suele ser más económica y sencilla de ejecutar frente a los sistemas de piso radiante; además, en caso de desperfecto, el mantenimiento también resulta tener un menor costo y dificultad de realizarse. Asimismo, el cielo radiativo permite distribuir el aire frío o caliente de manera más homogénea y con un tiempo de respuesta más rápido frente a otros sistemas de calefacción. Los sistemas radiativos utilizados en grandes edificaciones permiten reducir entre 30 y 40 cm las alturas necesarias para los conductos de ventilación, reduciéndose también el espacio requerido para máquinas y conducciones; además generan un ahorro de

Capítulo 3. Bombas de calor

energía en su funcionamiento ya que solo requieren accionar los sistemas de bombeo del agua de circulación en conjunto con el equipo de la bomba de calor. No obstante, frente a los tradicionales sistemas de climatización centralizada, tienen la desventaja de ser más complejos a la hora de llevar a cabo el servicio de mantención debido a su importante nivel de integración física con la infraestructura del edificio.



Figura 3.17. Cielo radiante (<https://pansogal.com/>)

3.4. Costos estimados de provisión, instalación y mantención de equipos

De acuerdo al estudio de mercado efectuado por el proyecto NAMA Chile, que fue realizado mediante encuesta a los distintos proveedores de sistemas de calefacción y refrigeración, donde se obtiene valores de equipos, instalación de los mismos y mantenciones, aunque no se indica un plan de mantención de las mismas.

Respecto de los sistemas tipo Split inverter, de acuerdo al estudio de mercado indicado, se presentan 38 proveedores, que van desde los \$205.000 a los \$400.000 con un promedio de \$301.717 sin IVA por equipo, mientras que la instalación presenta un valor promedio de \$133.173 y las mantenciones un promedio de \$46.363, todos valores sin IVA y a moneda del año 2020.

Por otro lado, los equipos para aerotermia reversible para climatización y ACS presentan valores con una alta dispersión por kWt, que va desde los \$54.706 hasta los \$425.000, con solo 18 proveedores de equipos en el país y para potencias menores a los 20 kWt. Para equipos de mayor potencia, ocurre que existen aún menos proveedores, sin embargo, el valor del equipo por kWt va

Capítulo 3. Bombas de calor

decreciendo. El promedio de venta de los equipos bajo los 20 kWt de potencia, es de \$288.705, un costo promedio de instalación del 39% del valor del proyecto y \$63.714 de mantención.

Capítulo 4. Factibilidad Técnica - Económica

Capítulo 4. Factibilidad Técnica - Económica

En este Capítulo, mostrarán los resultados de rentabilidad de los distintos escenarios configurados tanto de mejoramiento de las características de la vivienda, así como la propuesta de los equipos a instalar. Los equipos propuestos tienen relación con satisfacer la demanda energética en el rango estimado en las diversas simulaciones efectuadas y como se pudo ver en el capítulo anterior, existe una amplia gama de tipos de equipos que se definen por su funcionamiento y medio para entregar calor, sin embargo, este estudio se centra en aquellos del tipo aire – aire, cuya configuración es por medio de una unidad interior tipo Split pared y una unidad exterior.

La factibilidad económica de un proyecto o en particular lo relativo al presente estudio que pretende determinar la posibilidad de converger en una solución que permita incorporar un sistema de bomba de calor en una vivienda a la que se proyecta combinar distintas soluciones de envolvente como estrategia que permita reducir su demanda energética, es poder comprobar que si es posible o no llegar a esa combinación de modo que con las condiciones previamente establecidas sea beneficioso para la persona que destina recursos financieros como alternativa a otro medio de inversión. En este caso la evaluación de factibilidad se realizará desde el punto de vista de un inversionista privado, independientemente que este tipo de proyectos en general, son subsidiados y que de resultar favorable, con mayor razón será beneficioso para el Estado destinar recursos para este fin como una forma de apalancamiento para el desarrollo de esta tecnología de manera de potenciarlo en el tiempo y reducir así los costos de inversión iniciales.

Dada la configuración de la vivienda social y de la vivienda objeto en particular, y de acuerdo a las respectivas potencias requeridas para satisfacer la demanda energética, se estima que con un equipo ubicado en el recinto de living – comedor, es posible satisfacer las condiciones de confort.

Se efectúa esta comparación entre uso de leña y electricidad, basado en el estudio efectuado mediante encuesta por el Ministerio de Energía el año 2018, denominado “Informe Final de usos de la Energía de los hogares Chile 2018, se indica que de los energéticos disponibles en el país la leña se usa en un 39.6%, el gas en un 31.4% y la electricidad en un 25.7%, de lo cual el 53% se consume para calefacción, el 20% en agua caliente sanitaria y el resto en distintos equipos del hogar, situación que se replica en Concepción y en general en el centro sur del país, en que el uso de leña es mayoritario incluso superando los valores promedios del país.

Capítulo 4. Factibilidad Técnica - Económica

El procedimiento para estimar la factibilidad económica se efectuará mediante la comparación de un sistema de calefacción de referencia, que de acuerdo al informe “Medición Del Consumo Nacional de Leña y otros Combustibles Sólidos Derivados de la Madera”, 2015 elaborado por el CDT, que indica que la leña en la región del Biobío, tiene un 70% de penetración a nivel residencial, l constituye un equipo que para este caso es mediante la instalación de una estufa a combustión lenta con capacidad de calefaccionar de acuerdo a su respectivo catalogo técnico de marcas de Bosca y Amnesti con potencias similares, cuyos costos se pueden ver en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Equipos de combustión lenta a leña

| Nº | Tipo de equipo | Costo equipo (\$) | Costo instalación (\$) | Costo Mantenición (\$) | Eficiencia Energética |
|----|-----------------|-------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | Bosca – Eco 350 | \$349.990 | \$150,000.00 | \$50,000.00 | 68% |

La eficiencia del calefactor está dada por la etiqueta que otorga SEC y puede verse en la imagen 4.1.

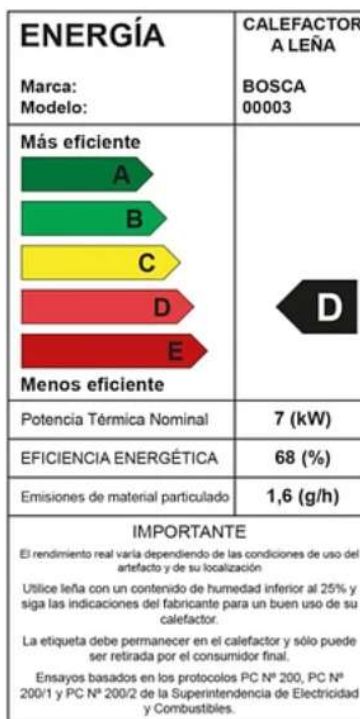


Figura 4.1. Etiqueta Eficiencia Energética calefactor a leña

Capítulo 4. Factibilidad Técnica - Económica

Respecto a los valores de mercado de la leña, dependiendo el formato de venta, esto es si por metro cúbico o por sacos de 25 kg., presentándose valores en el mercado local de \$5.100 a los \$7.500 por saco, estableciéndose además, según lo indicado por Fredes, 2014, que la leña de eucaliptus se caracteriza por tener un poder calorífico entre 4.311 – 4.648 kcal/kg o su equivalente por volumen que indica en su pagina web el Sistema de Certificación de Leña, que indica para su estado con un 25% de humedad, posee un poder calorífico de 1371,42 kg/m³., efectuando las conversiones necesarias, se tiene que el valor por Kwh fluctúa entre los \$47.50 a los \$71.26, adoptándose para este estudio el menor valor presentado, entendiéndose que es un valor conservador para efectuar los respectivos análisis.

Por otro lado, los valores de la electricidad, que es el energético con la cual los sistemas de climatización son alimentados, se estimaron de acuerdo a lo informado en el reporte mensual de la empresa eléctrica CGE en su página web <https://www.cge.cl/wp-content/uploads/2022/01/Tarifas-Suministro-CGE-Enero-2022.pdf>, considerando una tarifa BT1 que corresponde a hogares sin contrato especial, midiendo la tarifa consumida, no existiendo cobro directo por potencia demanda, con suministro de baja tensión y una potencia conectada menor a 10 Kw, por lo que constituye a la más demandada residencialmente, mostrándose los valores en la tabla 4.1, por ítemes de cobro de la empresa CGE que opera en la ciudad de Concepción.

Tabla 4.2. Desglose costo de electricidad para la ciudad de Concepción - CGE

| Cargo fijo \$/cliente | Cargo por uso del sistema de transmisión (\$/kwh) | Cargo por energía (\$/kwh) | Cargo por compras de potencia (\$/kwh) | Cargo por potencia base en su componente de distribución (\$/kwh) |
|----------------------------------|--|---|---|--|
| 1046.93 | 20.274 | 86.937 | 17.059 | 19.422 |

Para efectos de la evaluación de la factibilidad, se considera un valor de \$143.69/Kwh, sin considerar el cargo fijo, por cuanto no depende del consumo por calefacción. Se puede indicar también, que este valor se encuentra dentro de lo estimado para Chile en la página web www.globalpetrolprice.com/Chile que lo establece en \$142.634/kWh para hogares para el 01.09.2021.

En cuanto a los equipos propuestos, existe una amplia gama de tipos de sistemas de bomba de calor, así como también la eficiencia de éstos varía según los proveedores, su tecnología, y por sobre

Capítulo 4. Factibilidad Técnica - Económica

todo su rendimiento o Coeficiente de Performance, estudiándose la rentabilidad para 3 equipos con 3 distintas características y precios de instalación.

El primero con tecnología on-off tipo Split con COP de 3.2 para calentamiento. El segundo equipo analizado, es del tipo Split con tecnología inverter con un COP de 3.61 y el tercer equipo también con tecnología inverter, pero que además, que es capaz de suministrar tanta enfriamiento, calefacción y agua caliente sanitaria y que para efectos de este análisis se configurará solamente con un sistema interior tipo Split de muro.

En la Tabla 4.3 se pueden ver los valores actualizados de los equipos, que satisfacen la potencia requerida tanto de calefacción como enfriamiento indicado en la Tabla 2.6, y que pueden variar de acuerdo al fabricante y las fluctuaciones del precio del Dólar o Euro dependiendo la procedencia de los mismos, además de las eficiencias que estos puedan desarrollar, ya que existen equipos comercializados en el país bajo costo, pero con reducida eficiencia. bajo costo, pero con reducida eficiencia.

Tabla 4.3. Equipos propuestos para análisis de factibilidad

| Nº | Tipo de equipo | Costo equipo (\$) | Costo instalación (\$) | Costo Mantención (\$) | COP |
|----|----------------|-------------------|------------------------|-----------------------|------|
| 1 | Split On-off | \$280,000.00 | \$150,000.00 | \$50,000.00 | 3.2 |
| 2 | Split Inverter | \$390,000.00 | \$150,000.00 | \$50,000.00 | 3.61 |
| 3 | Multi Inverter | \$480,000.00 | \$150,000.00 | \$50,000.00 | 4.21 |

Se considera que los costos de mantención, corresponde a visitas cada tres años, para revisar estado del sistema eléctrico, contenedor y flujo de refrigerante, entre otras.

Se debe aclarar que el mercado actualmente ofrece sistemas tipo Split de pared, a costos menores que los presentados pero con bajos niveles de eficiencia comparativa con equipos que hoy se encuentran en desarrollo en mercados internacionales. Así como el nivel de potencia térmica que se encuentra en la oferta, existe una amplia gama para requerimientos por sobre los 8 kW de potencia térmica, cuando la potencia necesaria mínima de acuerdo a uno de los escenarios propuestos es de 2.5 kW.

Capítulo 4. Factibilidad Técnica - Económica

Por otro lado, respecto de los costos de acondicionamiento de la vivienda, se presentan escenarios en que se aumenta el espesor de la aislación a 80, 100, 120 y 140 mm, indicados como Esc 1, Esc 2, Esc 3 y Esc 4 respectivamente, además del escenario normativo actual con PDA vigente y que corresponde al Esc 0.

En el caso del vidrio, se considera como mejoramiento la incorporación de un vidrio tipo Low-E, mientras que en caso del mejoramiento de la hermeticidad desde 5 Ach a 50 Pa, se propone llegar a 3 Ach, considerando 3 acciones adicionales a lo que el P.D.A de Concepción exige, esto es, la incorporación de cinta auto expansible, instalada en los entre los marcos de puertas y ventanas, además de cinta para hermeticidad interior en la unión de la cubierta y muro perimetral, complementando con un enlucido de yeso por interior ya que el hormigón y la albañilería no son materiales completamente herméticos.

Los valores de las partidas considerados y actualizados para la estimación de la factibilidad económica se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Valores de provisión e instalación por mejoramiento propuesto

| Nº | Partida | Unidad | Valor instalado (\$) | Cantidad | Total (\$) |
|----|---------------------------------|----------------|----------------------|----------|------------|
| 1 | Poliestireno Expandido e=50 mm | m ² | 4,500.0 | 62.7 | 282,195.0 |
| 2 | Poliestireno Expandido e=80 mm | m ² | 6,500.0 | 62.7 | 407,615.0 |
| 3 | Poliestireno Expandido e=100 mm | m ² | 7,500.0 | 62.7 | 470,325.0 |
| 4 | Poliestireno Expandido e=120 mm | m ² | 8,600.0 | 62.7 | 539,306.0 |
| 5 | Poliestireno Expandido e=140 mm | m ² | 9,800.0 | 62.7 | 614,558.0 |
| 6 | Vidrio DVH 4/6/4 | m ² | 35,000.0 | 5.2 | 181,650.0 |
| 7 | Vidrio DVH 4/6/4 Low - e | m ² | 48,000.0 | 5.2 | 249,120.0 |
| 8 | Kompriband | ml | 1,256.3 | 31.3 | 39,322.2 |
| 9 | Cinta Hermeticidad | ml | 2,490.0 | 57.9 | 144,220.8 |
| 10 | Enlucido yeso interior | m ² | 950.0 | 57.5 | 54,625.0 |

La Tabla 4.5 muestra los valores de la inversión inicial tendría de acuerdo a los distintos escenarios, tanto a nivel de envolvente como la propuesta de 3 equipos con los valores de eficiencia que muestra en las respectivas fichas técnicas seleccionadas para su análisis, en este caso COP del Equipo 1 es 3.2, 4.6 para el Equipo 2 y 5.9 para el equipo 3.

Capítulo 4. Factibilidad Técnica - Económica

Tabla 4.5. Valores de inversión inicial para los escenarios planteados y 3 equipos propuestos

| Escenario Envolvente | Inversión Inicial Equipo Split on/off | Inversión Inicial Equipo Split Inverter 1 | Inversión Inicial Equipo Split Inverter 2 |
|---------------------------------|--|--|--|
| Esc 0.1 | \$668,167 | \$778,167 | \$868,167 |
| Esc 0.2 | \$735,637 | \$845,637 | \$935,637 |
| Esc 1 | \$555,420 | \$665,420 | \$755,420 |
| Esc 1.1 | \$793,587 | \$903,587 | \$993,587 |
| Esc 1.2 | \$861,057 | \$971,057 | \$1,061,057 |
| Esc 2 | \$618,130 | \$728,130 | \$818,130 |
| Esc 2.1 | \$856,297 | \$966,297 | \$1,056,297 |
| Esc 2.2 | \$923,767 | \$1,033,767 | \$1,123,767 |
| Esc 3 | \$687,111 | \$797,111 | \$887,111 |
| Esc 3.1 | \$925,278 | \$1,035,278 | \$1,125,278 |
| Esc 3.2 | \$992,748 | \$1,102,748 | \$1,192,748 |
| Esc 4 | \$762,363 | \$872,363 | \$962,363 |
| Esc 4.1 | \$1,000,530 | \$1,110,530 | \$1,200,530 |
| Esc 4.2 | \$1,068,000 | \$1,178,000 | \$1,268,000 |

Mientras que la Tabla 4.6, muestra los valores de energía consumida por equipo propuesto y por escenario de mejoramiento de envolvente.

Tabla 4.6. Valores de energía consumida para los escenarios planteados y 3 equipos propuestos

| Escenario Envolvente | Equipo Split On-Off Consumo Calefacción (kWh/año) | Equipo Split Inverter 1 Consumo Calefacción (kWh/año) | Equipo Split Inverter 2 Consumo Calefacción (kWh/año) |
|---------------------------------|--|--|--|
| Esc 0.1 | 535.34 | 474.54 | 406.91 |
| Esc 0.2 | 524.04 | 464.52 | 398.32 |
| Esc 1 | 500.81 | 443.93 | 380.66 |
| Esc 1.1 | 424.32 | 376.13 | 322.53 |
| Esc 1.2 | 410.43 | 363.82 | 311.97 |
| Esc 2 | 459.98 | 407.74 | 349.63 |
| Esc 2.1 | 385.20 | 341.45 | 292.79 |
| Esc 2.2 | 370.48 | 328.41 | 281.60 |
| Esc 3 | 439.64 | 389.71 | 334.17 |
| Esc 3.1 | 365.65 | 324.12 | 277.93 |
| Esc 3.2 | 350.30 | 310.52 | 266.26 |
| Esc 4 | 423.53 | 375.43 | 321.92 |
| Esc 4.1 | 350.17 | 310.40 | 266.16 |
| Esc 4.2 | 334.54 | 296.55 | 254.28 |

Con estos datos, podemos obtener los ahorros positivos o negativos, ya que las anualidades también incluyen los gastos por mantenimiento en planes trianuales.

Capítulo 4. Factibilidad Técnica - Económica

En la tabla 4.7, se muestran el cálculo de VAN y TIR a para los equipos 1, 2 y 3. Los detalles del flujo anual se pueden ver en el Anexo A.

Tabla 4.7 Resultados de evaluación económica para los escenarios y equipos propuestos

| Escenarios | Equipo 1 | | Equipo 2 | | Equipo 3 | |
|------------|----------------|------|----------------|-------|----------------|-----|
| | VAN | TIR | VAN | TIR | VAN | TIR |
| Esc 0.1 | \$3,050,274.00 | 83% | \$2,999,569.46 | 72.0% | \$2,975,525.82 | 66% |
| Esc 0.2 | \$2,993,825.26 | 75% | \$2,941,869.00 | 66.4% | \$2,916,433.03 | 61% |
| Esc 1 | \$3,196,698.22 | 101% | \$3,142,168.84 | 85.0% | \$3,113,870.71 | 76% |
| Esc 1.1 | \$3,033,122.55 | 72% | \$2,970,121.58 | 63.5% | \$2,932,400.21 | 58% |
| Esc 1.2 | \$2,979,201.57 | 66% | \$2,914,661.80 | 59.2% | \$2,875,228.76 | 55% |
| Esc 2 | \$3,173,808.07 | 91% | \$3,114,756.22 | 78.4% | \$3,081,427.59 | 71% |
| Esc 2.1 | \$3,008,565.56 | 67% | \$2,941,231.42 | 59.8% | \$2,898,690.12 | 55% |
| Esc 2.2 | \$2,955,449.35 | 62% | \$2,886,485.00 | 56.1% | \$2,842,130.37 | 52% |
| Esc 3 | \$3,124,657.93 | 82% | \$3,063,353.82 | 71.8% | \$3,027,519.92 | 65% |
| Esc 3.1 | \$2,958,650.96 | 62% | \$2,889,151.39 | 56.1% | \$2,844,201.40 | 52% |
| Esc 3.2 | \$2,906,149.96 | 58% | \$2,834,950.31 | 52.7% | \$2,788,109.26 | 49% |
| Esc 4 | \$3,065,123.45 | 75% | \$3,002,034.24 | 65.8% | \$2,964,214.73 | 60% |
| Esc 4.1 | \$2,898,502.18 | 58% | \$2,827,287.28 | 52.4% | \$2,780,429.28 | 49% |
| Esc 4.2 | \$2,846,267.70 | 54% | \$2,773,322.45 | 49.5% | \$2,724,539.72 | 46% |

La tabla N°4.3, muestra los resultados del análisis económico efectuado, en que muestra que es rentable la incorporación de sistemas de bomba de calor para todos los arreglos propuestos, resultando el más beneficioso aquel con el equipo Split On – Off, con un mejoramiento de la envolvente térmica de muro de un espesor de 80 mm de EPS de 20 kg/m³.

En la tabla 4.8 se muestran valores anuales de costo por calefacción de acuerdo a la proyección de la demanda energética estimada para cada estrategia de solución de envolvente, el que no incluye los valores relativas a las inversiones iniciales. En esta tabla se puede por un lado visualizar los ahorros por consumo de leña al efectuar las modificaciones a la envolvente térmica, pudiendo reducir los costos en alrededor un 46% para el Escenario 4.2 que contempla aislación térmica de EPS (20 Kg/m³) de 140 mm.

Capítulo 4. Factibilidad Técnica - Económica

Tabla 4.8 Resultados de evaluación económica para los escenarios y equipos propuestos

| Escenarios | Costo anual por consumo energético por calefacción | | | |
|------------|--|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | Calefactor a leña | Split Muro On – Off (COP 3.2) | Split Muro Inverter 1 (COP 3.61) | Split Muro Inverter 2 (COP 4.21) |
| Esc. 0 | \$137,440.08 | - | - | - |
| Esc 0.1 | \$119,664.28 | \$25,428.66 | \$22,540.64 | \$19,328.20 |
| Esc 0.2 | \$117,138.18 | \$24,891.86 | \$22,064.81 | \$18,920.18 |
| Esc 1 | \$111,945.37 | \$23,788.39 | \$21,086.66 | \$18,081.44 |
| Esc 1.1 | \$94,848.84 | \$20,155.38 | \$17,866.26 | \$15,320.00 |
| Esc 1.2 | \$91,743.36 | \$19,495.46 | \$17,281.30 | \$14,818.41 |
| Esc 2 | \$102,818.55 | \$21,848.94 | \$19,367.48 | \$16,607.27 |
| Esc 2.1 | \$86,104.06 | \$18,297.11 | \$16,219.05 | \$13,907.54 |
| Esc 2.2 | \$82,814.14 | \$17,598.00 | \$15,599.34 | \$13,376.15 |
| Esc 3 | \$98,273.26 | \$20,883.07 | \$18,511.31 | \$15,873.12 |
| Esc 3.1 | \$81,733.99 | \$17,368.47 | \$15,395.88 | \$13,201.69 |
| Esc 3.2 | \$78,303.06 | \$16,639.40 | \$14,749.61 | \$12,647.52 |
| Esc 4 | \$94,670.77 | \$20,117.54 | \$17,832.72 | \$15,291.24 |
| Esc 4.1 | \$78,272.29 | \$16,632.86 | \$14,743.81 | \$12,642.56 |
| Esc 4.2 | \$74,780.27 | \$15,890.81 | \$14,086.03 | \$12,078.52 |

Por último, se puede ver en la Tabla 4.9, ordenando los valores obtenidos del indicador de factibilidad VAN, para todos los escenarios y equipos de climatización, se puede ver que los primeros 5 lugares de VAN más alto, lo ocupan aquellas combinaciones que no mejora ni la hermeticidad de la envolvente ni la transmitancia térmica de las ventanas, y para espesores de EPS desde 80 mm a 120 mm y tanto para los equipos Split On-Off e inverter con COP 3.61.

Tabla 4.9 Resultados de evaluación económica para los escenarios y equipos propuestos

| N° | Escenario (Vivienda/Equipo) | VAN (12%) |
|----|-----------------------------|----------------|
| 1 | Esc 1-1 | \$3,196,698.22 |
| 2 | Esc 2-1 | \$3,173,808.07 |
| 3 | Esc 1-2 | \$3,142,168.84 |
| 4 | Esc 3-1 | \$3,124,657.93 |
| 5 | Esc 2-2 | \$3,114,756.22 |

Capítulo 5. Conclusiones y Comentarios

Capítulo 5. Conclusiones y Comentarios

Un adecuado sistema de calefacción en una vivienda social y en general para toda vivienda, influye de sobremanera en el bienestar de sus ocupantes, tanto del punto de vista económico en cuanto a la posibilidad de financiar a través del tiempo con energéticos que permitan su uso sin afectar los equipos y su propia salud como en aquellos artefactos que funcionan a llama abierta al interior de los recintos habitables con material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxido de nitrógeno por nombrar algunos y dependiendo del tipo de energético, así como también recintos con humedad y temperatura dentro de los rangos aceptados de confort que permitan el adecuado habitar de las viviendas.

La incorporación al mercado de la vivienda social en Chile de equipos avanzados como los revisados en este estudio en base a bombas de calor, se ha visto limitada y, si bien a nivel experimental e incluso piloto tenemos casos exitosos, por diversas razones, esta alternativa tecnológica no se ha logrado masificar. Entre las posibles razones se puede nombrar, el todavía relativamente al costo de la tecnología y de la energía eléctrica; la existencia de otras tecnologías competidoras que son más contaminantes pero tienen un costo de inversión y/o operación menor; la falta de sensibilización y educación medio ambiental; debilidades de la inversión del Estado en subsidios que afectan el potencial de apalancamiento privado de inversión; la existencias de paradigmas y arraigos culturales difíciles de superar, en particular en la zona centro sur asociados al uso de leña y; los todavía relativamente altos niveles de demanda energética de las viviendas en Chile.

Este trabajo postula como hipótesis que es posible, mediante un mejor arreglo de estándares de diseño pasivo, reducir la demanda energética a niveles mínimos óptimos aceptables para atenderla con sistemas bomba de calor de forma rentable, evaluada privadamente la inversión y operación a lo largo del ciclo de vida bajo parámetros normales de mercado, concluyéndose que efectivamente es posible dado el análisis efectuado mediante cálculo de indicadores económicos como VAN y TIR, para todos los escenarios propuestos y para los 3 equipos de bomba de calor propuestos. Respecto a los escenarios más favorables, con la relación de precios tanto de equipos, electricidad, leña, materiales de construcción utilizados en los arreglos constructivos, corresponde a aquellos con bajo de nivel de intervención, posicionándose como aquel más rentable el Escenario 1, es decir con aislación térmica de EPS en 80 mm de densidad de 20 kg/m², en segundo lugar con aislación

Capítulo 5. Conclusiones y Comentarios

térmica en EPS de 100 mm, densidad 20 kg/m³, o Escenario 2, ambos para el equipo Split Muro On – Off. Mientras que en el tercer lugar de mayor rentabilidad, se ubica nuevamente el Escenario 1, pero esta vez con el equipo Split Inverter con COP de 3.61.

Se debe indicar también, que la diferencia en el indicador del Valor Actual Neto, de la última posición de rentabilidad, correspondiente al Escenario 4.2 y Equipo Split Inverter (COP 4.21), es de alrededor de un 17%, por lo que el inversionista podrá valorar otros atributos que presenta un equipo de estas características dada la diferencia de tecnología entre los Split On-Off e Inverter, cuya principal diferencia radica en que este último al disponer de un inversor, modifica la velocidad del compresor de aire, haciéndolo más eficiente aún, con un mayor ahorro energético, menos ruido, sin cambios bruscos en la temperatura interior, mayor vida útil del equipo, a diferencia del sistema On-Off, que siempre que el equipo esté funcionando, éste lo hará al 100%.

Por otro lado, del análisis de los valores obtenidos del indicador económico TIR, se tiene que todos los valores obtenidos para todos los escenarios son mayores a 12% que es la tasa de descuento privada con la que se efectuó el análisis, obteniendo valores por sobre 46% para el escenario que resulta con una mayor inversión inicial, siendo beneficioso, para un análisis económico desde el punto de vista privado obteniendo de esta manera altas rentabilidades.

Con lo ya indicado, se puede indicar que una propuesta de incorporar sistemas avanzados de bomba de calor no solo es rentable económicamente, sino que va en la línea correcta de satisfacer o contribuir en el desarrollo sostenible, ya que satisface los 3 requerimientos que definen la sustentabilidad, es decir, lo económico, lo social y ecológico, ya que desde el punto de vista social, permite que las familias pueden mantener sus viviendas en rangos de confort adecuados, sin emisiones al ambiente, es decir, la componente asociada a la ecología y lo demostrado en que se comprueba que resulta rentable económicamente.

Para poder acceder a precios más convenientes en el mercado local, resultará apropiado que los organismos técnicos estatales, como el Ministerio de Medio Ambiente o el Vivienda y Urbanismo, presenten estrategias de difusión o incentivos al uso de esta tecnología en programas sociales, de forma que resulten un apalancamiento efectivo como una forma de masificar la instalación de estos equipos, subsidiando su instalación por algún tiempo acotado, en que los beneficiarios podrán ver disminuidos sus costos por calefacción. En este mismo punto, se debe tener en consideración que existen subsidios como es el que aporta el Ministerio de Medio Ambiente, para viviendas existentes,

Capítulo 5. Conclusiones y Comentarios

a través de un financiamiento para el recambio de calefactores, donde se eliminan aquellos que calefactores a leña ineficientes, privilegiando aquellos de biomasa como pellets, mediante programas de recambio de calefactores a leña. Sin embargo, los equipos de calefacción no se encuentran considerados como parte de los artefactos mínimos instalados y entregados a las familias en una vivienda social nueva en el caso de los programas habitacionales del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, como el DS 19 (Integración Social y Territorial) y 49 (Fondo Solidario), lo cual debiera ser obligatorio en zonas con P.D.A. vigente.

Actualmente este tipo de subsidios sólo considera la instalación de equipos fotovoltaicos y/o colectores solares para ACS, de manera opcional y en general para cualquier tipo de proyecto, independiente del lugar de su emplazamiento. En el caso del primero, los proponentes de los proyectos o Entidades Patrocinantes, entregan una propuesta de eficiencia energética, que incluso se evalúa positivamente el mejoramiento de la transmitancia térmica de la envolvente por sobre un 15% y la incorporación de equipos fotovoltaicos y/o colectores solares, por lo que la incorporación de un sistema de bomba de calor, incluso en sus versiones más eficientes que resultan con los valores más elevados, es factible tanto en complemento de los equipos con alimentación solar o en su reemplazo, dependiendo del análisis económico que el proponente efectúe ya que esto equivale aproximadamente al 2% del valor de las unidades habitacionales, que tienen un tope de 2.200 UF por vivienda.

Respecto de la disponibilidad de equipos en el mercado, se puede indicar que aunque se puede encontrar una amplia variedad de marcas en Chile, o a través de importaciones, no es posible encontrar aun equipos con potencias menores, para el dimensionamiento de una vivienda social, es decir, aun cuando se hicieron reducciones significativas en la demanda, el mismo equipo seleccionado fue utilizado para el análisis de todos los escenarios.

Como propuesta de nuevos análisis de factibilidad, se propone revisar la estrategia de reducción de emisiones de material particulado en vivienda existente. En este tipo de proyectos que financia de manera complementaria tanto el Ministerio de Vivienda como Medio Ambiente, en que a través de subsidio se financia la renovación energética de las viviendas de acuerdo al estándar técnico que impone el Plan de Descontaminación Atmosférica y que complementariamente se han estado instalando estufas a pellets, por lo que sería razonable estudiar la factibilidad de instalación de

Capítulo 5. Conclusiones y Comentarios

sistemas de calefacción avanzados de bomba de calor para vivienda existente y en comparación con los sistemas tradicionales que se encuentran actualmente en operación.

De la misma manera, se propone estudiar la instalación de bombas de calor con sistemas complementarios como sistemas fotovoltaicos, para viviendas de mayor superficie y buscando el equilibrio entre el consumo energético para calefacción y la energía proporcionada solarmente.

Referencias bibliográficas

Referencias bibliográficas

1. Bunster, V., Noguchi, M., García-Alvarado, R., & Bustamante, W. Consumo operativo de energía en vivienda social chilena: explorando los impactos de los cambios en el hogar.
2. Bustamante, W., Cepeda, R., Martínez, P., & Santa María, H. (2009). Eficiencia energética en vivienda social: un desafío posible. *Camino al Bicentenario-Propuestas para Chile*, 253-282.
3. Castaño Martínez, Camilo. Los pilares del desarrollo sostenible: sofisma o realidad / Camilo Castaño Martínez -- Bogotá : Universidad Santo Tomás. Vicerrectoría Universitaria Abierta y a Distancia, 2013 72 p. : fotografías, gráficos ; ISBN: 978-958-631-841-9 Incluye referencias bibliográficas y glosario
4. Aste, N., M. Buzzetti, P. Caputo & M. Manfren. 2014. Local energy efficiency programs: A monitoring methodology for heating systems. *Sustainable Cities and Society* 13 (2014): 69 - 77 pp.
5. Comisión Nacional de Energía & Agencia Alemana de Cooperación Técnica (CNE &GIZ). 2008. Proyecto Fomento de la Eficiencia Energética Determinación de línea base “anual” para la evaluación de la inversión en eficiencia energética en el sector residencial invierno 2007 – verano 2008, Santiago de Chile.
6. Usos de energía de los Hogares Chile 2018 – Informe Final, In – Data, Diciembre 2019.
7. Corporación de Desarrollo Tecnológico & Cámara Chilena de la Construcción (CDT & CChC). 2010. Informe Final y Resumen Ejecutivo, Estudio de usos finales y curva de la oferta de conservación de la energía en el sector residencial. Santiago de Chile. 15 de septiembre de 2010.
8. Estudio de Mercado de Bombas de Calor. 2020. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
9. Fredes, N. (2014) Evaluación Técnica y Económica de una Planta de Producción de Combustible Sólido a Partir de Biomasa Forestal en la Región de Los Lagos.
10. MMA (2015). Decreto 11 declara zona saturada por material particulado fino respirables MP2.5 y por material particulado respirables MP10, ambas como concentración diaria, a la comuna de Los Ángeles. Ministerio del Medio Ambiente, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile
11. Ministerio de Medio Ambiente (MMA). 2011. Informe del Estado del Medio Ambiente, Segunda Edición, Santiago de Chile.
12. Ministerio de Medio Ambiente. 2012. Decreto N°12. Establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP 2,5. Diario Oficial de la República de Chile. 09 mayo 2011. Santiago, Chile.
13. Ministerio de Medio Ambiente. 2013. Decreto N°36. Declara zona saturada por material particulado respirable mp10 y por material particulado fino respirable MP2, 5, ambas como concentración diaria; y declara zona latente por material particulado respirable MP10, como concentración anual, a las comunas de Chillán y Chillán Viejo. Diario Oficial de la República de Chile. 25 marzo 2013. Santiago, Chile.
14. Ministerio de Medio Ambiente. 2016. Decreto N°48. Establece plan de prevención y descontaminación atmosférica para las comunas de Chillán y Chillán Viejo. Diario Oficial de la República de Chile. 28 marzo 2016. Santiago, Chile.
15. Sistema de Información Nacional de Calidad ambiental (SINCA). 2009. Redes de monitoreo en línea. <http://sinca.mma.gob.cl/index.php/redes>.
16. Universidad Católica de Temuco. 2009. Inventario de emisiones atmosféricas para las ciudades de Chillan y Los Ángeles. Unidad de Calidad del Aire, Universidad Católica de Temuco, Temuco, Chile.

Referencias bibliográficas

17. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). (2012). Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado.
18. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2014). IPCC: Las emisiones de gases de efecto invernadero se aceleran a pesar de las medidas para reducirlas.
19. Investigación y Proceso de MAPS Chile, Ministerio del Medio Ambiente (MMA) (2014). Opciones de mitigación para enfrentar el cambio climático: resultados de Fase 2. Santiago, Chile.
20. Aravena D. et. al. (2016). Assessment of high enthalpy geothermal resources and promising areas of Chile. *Geothermics*. vol 59, p. 1-13
21. Bustamante W., Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) y Programa País de Eficiencia Energética (PPEE) (2009). Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social.
22. Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC) (2007). Reglamentación Térmica. Instituto Nacional de Normalización (INN). (2008). Arquitectura y construcción:
23. Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico. NCh1079 Of.2008. Santiago, Chile.
24. Romero N. (2011). Consumo de energía a nivel residencial en Chile y análisis de eficiencia energética en calefacción. Trabajo de Título. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
25. Guevara J. (2015). Reacondicionamiento térmico de viviendas: criterios de intervención integral. Trabajo de Título. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
26. Kusuda T., Achenbach P.R. (1965). Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States. *ASHRAE Transactions*. vol. 71, p. 61-75.
27. Bobadilla, A. (2014). Manual de hermeticidad al aire de edificaciones. Universidad del Bío-Bío, Centro de Investigación
28. International Standard ISO 6946 (2007). Building components and buildings elements– Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method.
29. L. Adelard et. al. (1998). Sky temperature modelisation and applications in buildings simulation. *Renewable Energy* vol. 15, p. 418-430.
30. Programa de Gestión y Economía Ambiental (PROGEA) (2014). Alternativas Tecnológicas para Calefacción Residencial con Energía Renovables No Convencionales. Aplicables a la Realidad Chilena – Informe final. Universidad y Tecnología (UNTEC): Fundación para la Transferencia de Tecnología. Chile
31. ASHRAE (2009). Handbook, Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA, USA.
32. Oschner K. (2007). Geothermal heat pumps: a guide for planning and installing. Earthscan, London, UK.
33. Moran M. & Shapiro H. (2004). Fundamentos de Termodinámica Técnica. Segunda. Edición. Editorial Reverté S.A.
34. Sarbu, C. Sebarchievici (2016). Ground Source Heat Pumps: Fundamentals Experiments and Applications. Academic Press-Elsevier.
35. Zenteno A. (2013). Modelación térmica del suelo alrededor de tubos enterrados en sistemas de colección de energía de baja entalpía. Trabajo de Título. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Chile.
36. Fuenzalida F. (2014). Diseño y evaluación de un intercambiador de calor para recuperar energía geotérmica de muy baja entalpía. Trabajo de Título. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Chile.

Referencias bibliográficas

37. Raúl O’Ryan, Manuel Díaz, Jaques Clerc. 2010. Consumo de Energía y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Chile 2007-2030 y Opciones de Mitigación. Programa de Gestión y Economía Ambiental. Universidad de Chile.
38. Guía del Estandar Passivehaus, Edificios de consumo energético casi nulo. 2011 (<https://passivehouse-international.org/upload/Guia-del-Estandar-Passivhaus-fenercom-2011.pdf>)

Anexo

Anexo A. Tabla de Cálculo VAN y TIR, por equipos de calefacción.

Equipo 1

| | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 | Año 6 | Año 7 | Año 8 | Año 9 | Año 10 | Año 11 | Año 12 | Año 13 | Año 14 | Año 15 | VAN | TIR |
|---------|------------------|------------|--------------|--------------|------------|------------|--------------|------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|------------|--------------|------------|----------------|------|
| Esc 0.1 | -\$ 668,167.00 | 560,774.72 | \$560,774.72 | \$510,774.72 | 560,774.72 | 560,774.72 | \$510,774.72 | 560,774.72 | 560,774.72 | \$510,774.72 | 560,774.72 | \$510,774.72 | 560,774.72 | 560,774.72 | \$510,774.72 | 560,774.72 | \$3,050,274.00 | 83% |
| Esc 0.2 | -\$ 735,637.00 | 562,392.91 | \$562,392.91 | \$512,392.91 | 562,392.91 | 562,392.91 | \$512,392.91 | 562,392.91 | 562,392.91 | \$512,392.91 | 562,392.91 | \$512,392.91 | 562,392.91 | 562,392.91 | \$512,392.91 | 562,392.91 | \$2,993,825.26 | 75% |
| Esc 1 | -\$ 555,420.00 | 565,719.35 | \$565,719.35 | \$515,719.35 | 565,719.35 | 565,719.35 | \$515,719.35 | 565,719.35 | 565,719.35 | \$515,719.35 | 565,719.35 | \$515,719.35 | 565,719.35 | 565,719.35 | \$515,719.35 | 565,719.35 | \$3,196,698.22 | 101% |
| Esc 1.1 | -\$ 793,587.00 | 576,671.17 | \$576,671.17 | \$526,671.17 | 576,671.17 | 576,671.17 | \$526,671.17 | 576,671.17 | 576,671.17 | \$526,671.17 | 576,671.17 | \$526,671.17 | 576,671.17 | 576,671.17 | \$526,671.17 | 576,671.17 | \$3,033,122.55 | 72% |
| Esc 1.2 | -\$ 861,057.00 | 578,660.49 | \$578,660.49 | \$528,660.49 | 578,660.49 | 578,660.49 | \$528,660.49 | 578,660.49 | 578,660.49 | \$528,660.49 | 578,660.49 | \$528,660.49 | 578,660.49 | 578,660.49 | \$528,660.49 | 578,660.49 | \$2,979,201.57 | 66% |
| Esc 2 | -\$ 618,130.00 | 571,565.87 | \$571,565.87 | \$521,565.87 | 571,565.87 | 571,565.87 | \$521,565.87 | 571,565.87 | 571,565.87 | \$521,565.87 | 571,565.87 | \$521,565.87 | 571,565.87 | 571,565.87 | \$521,565.87 | 571,565.87 | \$3,173,808.07 | 91% |
| Esc 2.1 | -\$ 856,297.00 | 582,272.96 | \$582,272.96 | \$532,272.96 | 582,272.96 | 582,272.96 | \$532,272.96 | 582,272.96 | 582,272.96 | \$532,272.96 | 582,272.96 | \$532,272.96 | 582,272.96 | 582,272.96 | \$532,272.96 | 582,272.96 | \$3,008,565.56 | 67% |
| Esc 2.2 | -\$ 923,767.00 | 584,380.44 | \$584,380.44 | \$534,380.44 | 584,380.44 | 584,380.44 | \$534,380.44 | 584,380.44 | 584,380.44 | \$534,380.44 | 584,380.44 | \$534,380.44 | 584,380.44 | 584,380.44 | \$534,380.44 | 584,380.44 | \$2,955,449.35 | 62% |
| Esc 3 | -\$ 687,111.00 | 574,477.52 | \$574,477.52 | \$524,477.52 | 574,477.52 | 574,477.52 | \$524,477.52 | 574,477.52 | 574,477.52 | \$524,477.52 | 574,477.52 | \$524,477.52 | 574,477.52 | 574,477.52 | \$524,477.52 | 574,477.52 | \$3,124,657.93 | 82% |
| Esc 3.1 | -\$ 925,278.00 | 585,072.37 | \$585,072.37 | \$535,072.37 | 585,072.37 | 585,072.37 | \$535,072.37 | 585,072.37 | 585,072.37 | \$535,072.37 | 585,072.37 | \$535,072.37 | 585,072.37 | 585,072.37 | \$535,072.37 | 585,072.37 | \$2,958,650.96 | 62% |
| Esc 3.2 | -\$ 992,748.00 | 587,270.18 | \$587,270.18 | \$537,270.18 | 587,270.18 | 587,270.18 | \$537,270.18 | 587,270.18 | 587,270.18 | \$537,270.18 | 587,270.18 | \$537,270.18 | 587,270.18 | 587,270.18 | \$537,270.18 | 587,270.18 | \$2,906,149.96 | 58% |
| Esc 4 | -\$ 762,363.00 | 576,785.24 | \$576,785.24 | \$526,785.24 | 576,785.24 | 576,785.24 | \$526,785.24 | 576,785.24 | 576,785.24 | \$526,785.24 | 576,785.24 | \$526,785.24 | 576,785.24 | 576,785.24 | \$526,785.24 | 576,785.24 | \$3,065,123.45 | 75% |
| Esc 4.1 | -\$ 1,000,530.00 | 587,289.88 | \$587,289.88 | \$537,289.88 | 587,289.88 | 587,289.88 | \$537,289.88 | 587,289.88 | 587,289.88 | \$537,289.88 | 587,289.88 | \$537,289.88 | 587,289.88 | 587,289.88 | \$537,289.88 | 587,289.88 | \$2,898,502.18 | 58% |
| Esc 4.2 | -\$ 1,068,000.00 | 589,526.83 | \$589,526.83 | \$539,526.83 | 589,526.83 | 589,526.83 | \$539,526.83 | 589,526.83 | 589,526.83 | \$539,526.83 | 589,526.83 | \$539,526.83 | 589,526.83 | 589,526.83 | \$539,526.83 | 589,526.83 | \$2,846,267.70 | 54% |

Equipo 2

| | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 | Año 6 | Año 7 | Año 8 | Año 9 | Año 10 | Año 11 | Año 12 | Año 13 | Año 14 | Año 15 | VAN | TIR |
|---------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|-------|
| Esc 0.1 | -\$ 778,167.00 | 569,480.7 | 569,480.7 | 519,480.7 | 569,480.7 | 569,480.7 | 519,480.7 | 569,480.7 | 569,480.7 | 519,480.7 | 569,480.7 | 569,480.7 | 519,480.7 | 569,480.7 | 569,480.7 | 519,480.7 | \$2,999,569.46 | 72.0% |
| Esc 0.2 | -\$ 845,637.00 | 570,915.1 | 570,915.1 | 520,915.1 | 570,915.1 | 570,915.1 | 520,915.1 | 570,915.1 | 570,915.1 | 520,915.1 | 570,915.1 | 570,915.1 | 520,915.1 | 570,915.1 | 570,915.1 | 520,915.1 | \$2,941,869.00 | 66.4% |
| Esc 1 | -\$ 665,420.00 | 573,863.8 | 573,863.8 | 523,863.8 | 573,863.8 | 573,863.8 | 523,863.8 | 573,863.8 | 573,863.8 | 523,863.8 | 573,863.8 | 573,863.8 | 523,863.8 | 573,863.8 | 573,863.8 | 523,863.8 | \$3,142,168.84 | 85.0% |
| Esc 1.1 | -\$ 903,587.00 | 583,571.8 | 583,571.8 | 533,571.8 | 583,571.8 | 583,571.8 | 533,571.8 | 583,571.8 | 583,571.8 | 533,571.8 | 583,571.8 | 583,571.8 | 533,571.8 | 583,571.8 | 583,571.8 | 533,571.8 | \$2,970,121.58 | 63.5% |
| Esc 1.2 | -\$ 971,057.00 | 585,335.2 | 585,335.2 | 535,335.2 | 585,335.2 | 585,335.2 | 535,335.2 | 585,335.2 | 585,335.2 | 535,335.2 | 585,335.2 | 585,335.2 | 535,335.2 | 585,335.2 | 585,335.2 | 535,335.2 | \$2,914,661.80 | 59.2% |
| Esc 2 | -\$ 728,130.00 | 579,046.3 | 579,046.3 | 529,046.3 | 579,046.3 | 579,046.3 | 529,046.3 | 579,046.3 | 579,046.3 | 529,046.3 | 579,046.3 | 579,046.3 | 529,046.3 | 579,046.3 | 579,046.3 | 529,046.3 | \$3,114,756.22 | 78.4% |
| Esc 2.1 | -\$ 966,297.00 | 588,537.3 | 588,537.3 | 538,537.3 | 588,537.3 | 588,537.3 | 538,537.3 | 588,537.3 | 588,537.3 | 538,537.3 | 588,537.3 | 588,537.3 | 538,537.3 | 588,537.3 | 588,537.3 | 538,537.3 | \$2,941,231.42 | 59.8% |
| Esc 2.2 | -\$ 1,033,767.00 | 590,405.5 | 590,405.5 | 540,405.5 | 590,405.5 | 590,405.5 | 540,405.5 | 590,405.5 | 590,405.5 | 540,405.5 | 590,405.5 | 590,405.5 | 540,405.5 | 590,405.5 | 590,405.5 | 540,405.5 | \$2,886,485.00 | 56.1% |
| Esc 3 | -\$ 797,111.00 | 581,627.3 | 581,627.3 | 531,627.3 | 581,627.3 | 581,627.3 | 531,627.3 | 581,627.3 | 581,627.3 | 531,627.3 | 581,627.3 | 581,627.3 | 531,627.3 | 581,627.3 | 581,627.3 | 531,627.3 | \$3,063,353.82 | 71.8% |
| Esc 3.1 | -\$ 1,035,278.00 | 591,018.8 | 591,018.8 | 541,018.8 | 591,018.8 | 591,018.8 | 541,018.8 | 591,018.8 | 591,018.8 | 541,018.8 | 591,018.8 | 591,018.8 | 541,018.8 | 591,018.8 | 591,018.8 | 541,018.8 | \$2,889,151.39 | 56.1% |
| Esc 3.2 | -\$ 1,102,748.00 | 592,967.0 | 592,967.0 | 542,967.0 | 592,967.0 | 592,967.0 | 542,967.0 | 592,967.0 | 592,967.0 | 542,967.0 | 592,967.0 | 592,967.0 | 542,967.0 | 592,967.0 | 592,967.0 | 542,967.0 | \$2,834,950.31 | 52.7% |
| Esc 4 | -\$ 872,363.00 | 583,672.9 | 583,672.9 | 533,672.9 | 583,672.9 | 583,672.9 | 533,672.9 | 583,672.9 | 583,672.9 | 533,672.9 | 583,672.9 | 583,672.9 | 533,672.9 | 583,672.9 | 583,672.9 | 533,672.9 | \$3,002,034.24 | 65.8% |
| Esc 4.1 | -\$ 1,110,530.00 | 592,984.5 | 592,984.5 | 542,984.5 | 592,984.5 | 592,984.5 | 542,984.5 | 592,984.5 | 592,984.5 | 542,984.5 | 592,984.5 | 592,984.5 | 542,984.5 | 592,984.5 | 592,984.5 | 542,984.5 | \$2,827,287.28 | 52.4% |
| Esc 4.2 | -\$ 1,178,000.00 | 594,967.4 | 594,967.4 | 544,967.4 | 594,967.4 | 594,967.4 | 544,967.4 | 594,967.4 | 594,967.4 | 544,967.4 | 594,967.4 | 594,967.4 | 544,967.4 | 594,967.4 | 594,967.4 | 544,967.4 | \$2,773,322.45 | 49.5% |

Anexo

Equipo 3

| | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 | Año 6 | Año 7 | Año 8 | Año 9 | Año 10 | Año 11 | Año 12 | Año 13 | Año 14 | Año 15 | VAN | TIR |
|---------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|-------|
| Esc 0.1 | \$-868,167.00 | 579,164.7 | 579,164.7 | 529,164.7 | 579,164.7 | 579,164.7 | 529,164.7 | 579,164.7 | 579,164.7 | 529,164.7 | 579,164.7 | 579,164.7 | 529,164.7 | 579,164.7 | 579,164.7 | 529,164.7 | \$2,975,525.82 | 65.6% |
| Esc 0.2 | \$-935,637.00 | 580,394.7 | 580,394.7 | 530,394.7 | 580,394.7 | 580,394.7 | 530,394.7 | 580,394.7 | 580,394.7 | 530,394.7 | 580,394.7 | 580,394.7 | 530,394.7 | 580,394.7 | 580,394.7 | 530,394.7 | \$2,916,433.03 | 61.0% |
| Esc 1 | \$-755,420.00 | 582,923.1 | 582,923.1 | 532,923.1 | 582,923.1 | 582,923.1 | 532,923.1 | 582,923.1 | 582,923.1 | 532,923.1 | 582,923.1 | 582,923.1 | 532,923.1 | 582,923.1 | 582,923.1 | 532,923.1 | \$3,113,870.71 | 76.0% |
| Esc 1.1 | \$-993,587.00 | 591,247.5 | 591,247.5 | 541,247.5 | 591,247.5 | 591,247.5 | 541,247.5 | 591,247.5 | 591,247.5 | 541,247.5 | 591,247.5 | 591,247.5 | 541,247.5 | 591,247.5 | 591,247.5 | 541,247.5 | \$2,932,400.21 | 58.5% |
| Esc 1.2 | \$-1,061,057.00 | 592,759.6 | 592,759.6 | 542,759.6 | 592,759.6 | 592,759.6 | 542,759.6 | 592,759.6 | 592,759.6 | 542,759.6 | 592,759.6 | 592,759.6 | 542,759.6 | 592,759.6 | 592,759.6 | 542,759.6 | \$2,875,228.76 | 54.8% |
| Esc 2 | \$-818,130.00 | 587,367.0 | 587,367.0 | 537,367.0 | 587,367.0 | 587,367.0 | 537,367.0 | 587,367.0 | 587,367.0 | 537,367.0 | 587,367.0 | 587,367.0 | 537,367.0 | 587,367.0 | 587,367.0 | 537,367.0 | \$3,081,427.59 | 70.7% |
| Esc 2.1 | \$-1,056,297.00 | 595,505.4 | 595,505.4 | 545,505.4 | 595,505.4 | 595,505.4 | 545,505.4 | 595,505.4 | 595,505.4 | 545,505.4 | 595,505.4 | 595,505.4 | 545,505.4 | 595,505.4 | 595,505.4 | 545,505.4 | \$2,898,690.12 | 55.3% |
| Esc 2.2 | \$-1,123,767.00 | 597,107.3 | 597,107.3 | 547,107.3 | 597,107.3 | 597,107.3 | 547,107.3 | 597,107.3 | 597,107.3 | 547,107.3 | 597,107.3 | 597,107.3 | 547,107.3 | 597,107.3 | 597,107.3 | 547,107.3 | \$2,842,130.37 | 52.1% |
| Esc 3 | \$-887,111.00 | 589,580.2 | 589,580.2 | 539,580.2 | 589,580.2 | 589,580.2 | 539,580.2 | 589,580.2 | 589,580.2 | 539,580.2 | 589,580.2 | 589,580.2 | 539,580.2 | 589,580.2 | 589,580.2 | 539,580.2 | \$3,027,519.92 | 65.4% |
| Esc 3.1 | \$-1,125,278.00 | 597,633.2 | 597,633.2 | 547,633.2 | 597,633.2 | 597,633.2 | 547,633.2 | 597,633.2 | 597,633.2 | 547,633.2 | 597,633.2 | 597,633.2 | 547,633.2 | 597,633.2 | 597,633.2 | 547,633.2 | \$2,844,201.40 | 52.1% |
| Esc 3.2 | \$-1,192,748.00 | 599,303.8 | 599,303.8 | 549,303.8 | 599,303.8 | 599,303.8 | 549,303.8 | 599,303.8 | 599,303.8 | 549,303.8 | 599,303.8 | 599,303.8 | 549,303.8 | 599,303.8 | 599,303.8 | 549,303.8 | \$2,788,109.26 | 49.2% |
| Esc 4 | \$-962,363.00 | 591,334.2 | 591,334.2 | 541,334.2 | 591,334.2 | 591,334.2 | 541,334.2 | 591,334.2 | 591,334.2 | 541,334.2 | 591,334.2 | 591,334.2 | 541,334.2 | 591,334.2 | 591,334.2 | 541,334.2 | \$2,964,214.73 | 60.4% |
| Esc 4.1 | \$-1,200,530.00 | 599,318.8 | 599,318.8 | 549,318.8 | 599,318.8 | 599,318.8 | 549,318.8 | 599,318.8 | 599,318.8 | 549,318.8 | 599,318.8 | 599,318.8 | 549,318.8 | 599,318.8 | 599,318.8 | 549,318.8 | \$2,780,429.28 | 48.9% |
| Esc 4.2 | \$-1,268,000.00 | 601,019.1 | 601,019.1 | 551,019.1 | 601,019.1 | 601,019.1 | 551,019.1 | 601,019.1 | 601,019.1 | 551,019.1 | 601,019.1 | 601,019.1 | 551,019.1 | 601,019.1 | 601,019.1 | 551,019.1 | \$2,724,539.72 | 46.4% |