

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Análisis comparativo de la implementación de bombas de calor como sistema sostenible de climatización frente a un sistema de aire acondicionado en un apartamento ubicado en Ciudad de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Carlos Alfonzo Coti Bosarreyes para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil Industrial

Guatemala,

2024

Análisis comparativo de la implementación de bombas de calor como sistema sostenible de climatización frente a un sistema de aire acondicionado en un apartamento ubicado en Ciudad de Guatemala

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Análisis comparativo de la implementación de bombas de calor como sistema sostenible de climatización frente a un sistema de aire acondicionado en un apartamento ubicado en Ciudad de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Carlos Alfonzo Coti Bosarreyes para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil Industrial

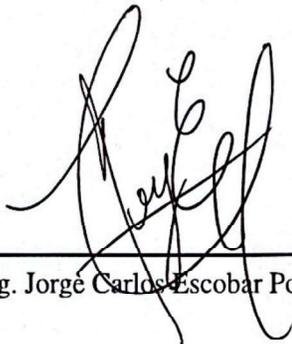
Guatemala,

2024

Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Jorge Carlos Escobar Polanco

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Jorge Carlos Escobar Polanco

(f) 
Arq. José Alfredo Méndez Ibarra

(f) 
Ing. Robert Gode Davensen

Fecha de aprobación: Guatemala, 09 de enero de 2024.

CONTENIDO

	Página
LISTA DE CUADROS.....	VII
LISTA DE GRÁFICOS.....	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	3
III. JUSTIFICACIÓN	4
IV. OBJETIVOS	5
A Objetivo general	5
B Objetivos específicos	5
V. MARCO TEÓRICO	6
A Fuentes de energía renovable	6
1 Energía eólica	6
2 Energía solar	7
3 Energía hidráulica	7
4 Energía geotérmica	7
B Unidad de aire acondicionado tradicional	7
C Principales componentes de un sistema de aire acondicionado	7
1 Unidad interior - Evaporador	7
2 Válvula de expansión	7
3 Unidad exterior – Condensador	7
4 Compresor	8
5 Gas refrigerante	8
6 Termostato	8
D Sistemas de calefacción tradicionales:	9
1 Radiadores:	9
2 Calefacción por suelo radiante:	9
3 Calentadores de agua:	9
4 Calentadores de paso:	9
E Bombas de calor	10
F Tipos de bombas de calor	10
1 Bombas aire-aire	10

	2	Bombas aire-agua	10
	3	Bombas agua-aire	11
	4	Bombas de calor geotérmicas	12
G		Principio de funcionamiento de las bombas de calor	12
H		Componentes básicos de una bomba de calor	14
	1	Compresor:	14
	2	Condensador:	14
	3	Válvula de expansión:.....	14
	4	Evaporador:.....	14
I		Bombas de calor para la climatización sostenible de espacios.....	15
J		Intercambiadores de calor.....	15
	1	Intercambiador de calor directo:.....	16
	2	Intercambiador de calor indirecto:.....	16
K		Consideraciones de seguridad y mantenimiento.....	16
	1	Unidades interiores:.....	16
	2	Unidades exteriores:.....	17
L		Beneficios de la bomba de calor.....	17
M		Condiciones del mercado para bombas de calor.....	17
N		Bases de datos comerciales.....	18
Ñ		Consideraciones financieras.....	19
	1	Costo inicial.....	20
	2	Tamaño de la unidad.....	20
	3	Marca del equipo.....	20
	4	Coefficiente de eficiencia.....	21
O		Uso de energía en las bombas de calor.....	21
P		Emisiones de gases de efecto invernadero.....	22
Q		Estándares gubernamentales o de la industria.....	23
	1	Estándares de eficiencia energética:.....	23
	2	Normas de seguridad:.....	23
	3	Incentivos y políticas alrededor del mundo:.....	24
R		Requerimientos de espacio.....	25
S		Principal diferencia entre un aire acondicionado y una bomba de calor.....	25
T		Refrigerantes y su impacto en el medio ambiente.....	25
	1	Refrigerantes sustitutos:.....	26
U		Estrategias para optimizar la energía en un recinto climatizado mecánicamente.....	26
V		Calidad del ambiente en interiores:.....	27
W		Síndrome del edificio enfermo.....	28
X		Principales factores responsables del Síndrome del Edificio Enfermo.....	28
	1	Contaminantes químicos de fuentes exteriores:.....	28
	2	Contaminantes químicos de fuentes interiores:.....	28
	3	Contaminantes biológicos:.....	29
	4	Ventilación inadecuada:.....	29

Y	Purificadores de aire	29
Z	Termodinámica.....	29
	1 Calor sensible y su almacenamiento en edificaciones.....	30
	2 Calor latente y su almacenamiento en edificaciones.....	30
	3 Carga térmica.....	30
VI.	METODOLOGÍA.....	31
A	Análisis de cargas térmicas del apartamento analizado	32
B	Datos del espacio a climatizar	32
C	Selección de equipos	36
	1 Tonelada de refrigeración.....	36
	2 Refrigerante R410A.....	38
	3 Coeficiente SEER	38
D	Estimación de emisiones de GEI.....	40
E	Consumo de electricidad del equipo de aire acondicionado AC122CE – Hisense: .	42
F	Emisiones de GEI del equipo de aire acondicionado AC122CE – Hisense:.....	42
G	Consumo de electricidad del equipo de bomba de calor Mini Split Xpower – Carrier:	42
H	Emisiones de GEI del equipo de bomba de calor Mini Split Xpower – Carrier.....	42
I	Análisis costo - beneficio	42
	1 Objetivo del análisis:.....	43
	2 Resumen de los costos asociados a ambas unidades de climatización:	43
	3 Beneficios más importantes de las bombas de calor	43
J	Análisis económico	44
	1 Valor Presente Neto (VPN):.....	44
	2 Relación costo-beneficio (BCR):	45
	3 Retorno sobre la inversión (ROI):.....	45
	4 Periodo de recuperación:.....	45
K	Recopilación de los resultados del análisis económico:	46
VII.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	48
A	Carga térmica	48
B	Emisiones de GEI en cada equipo	49
C	Costos asociados a cada equipo.....	50
D	Análisis económico	51
E	Recomendaciones para para el proceso de instalación, mantenimiento y control de una bomba de calor aire – aire:.....	52
	1 Consideraciones importantes al momento de instalar una bomba de calor: .	52
	2 Consideraciones en el mantenimiento:.....	53
	3 Consideraciones en el área de control:.....	54
VIII.	CONCLUSIONES	55
IX.	RECOMENDACIONES.....	56

X. BIBLIOGRAFÍA	57
XI. ANEXOS	61
A Tablas empleadas en los cálculos de carga térmica.....	61

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Costos totales del sistema, instalación y mantenimiento	19
2	Costos iniciales para una bomba Aire-Aire	20
3	Tabla de tamaño de la unidad con base en el espacio requerido	20
4	Tabla con costos de una bomba de calor por marca.....	21
5	Tabla con costos de operación por mes.....	22
6	Dimensiones de la habitación considerada: Sala – comedor	32
7	Especificaciones de las paredes	32
8	Especificaciones de aberturas	33
9	Condiciones anuales de diseño de calefacción y humidificación.....	33
10	Temperaturas externas	33
11	Temperaturas internas.....	33
12	Cálculo de conducción térmica en las paredes que no les pega el sol.....	33
13	Cálculo de conducción térmica en la pared que le pega el sol (Pared Norte).....	34
14	Cálculo de conducción térmica en la puerta	34
15	Calor debido a los ocupantes	34
16	Ganancia de calor debido a los equipos.....	34
17	Cálculo de conducción térmica en el techo	34
18	Cálculo de conducción térmica en el piso.....	34
19	Infiltración por hendeduras a través de ventanas y puertas	35
20	Condiciones externas.....	35
21	Condiciones internas	35
22	Cálculo de la humedad específica y densidad del aire	35
23	Carga térmica total	36
24	Resumen de las características de los equipos seleccionados	37
25	Factor de emisión para cada tipo de combustible	41
26	Costo de operación para cada equipo	43
27	Recopilación de los costos involucradas en ambos equipos	43
28	Resultados del análisis de económico.....	47
29	Continuación de los resultados del análisis de económico	47

LISTA DE GRÁFICOS

Ilustración	Página
1 Partes de un aire acondicionado convencional.....	8
2 Diagrama de una bomba aire-aire.....	10
3 Diagrama de una bomba aire-agua	11
4 Diagrama de una bomba agua-aire	11
5 Diagrama de una bomba geotérmica	12
6 Ciclo de refrigeración por compresión de vapor: a) Refrigerador, b) Bomba de calor	13
7 Principio de funcionamiento de una bomba de calor.....	14
8 Diagrama de un sistema de bomba de calor aire - aire.....	15
9 Diagrama Intercambiador de calor	16
10 Crecimiento del Mercado de Bombas de Calor en USA.....	18
11 Crecimiento en ventas de las bombas de calor en diferentes regiones.....	19
12 Aislamiento térmico de la ropa para varios niveles de confort	28
13 Planta del apartamento dimensionado	32
14 Equipo de aire acondicionado modelo AC122CE de la marca Hisense.....	37
15 Equipo de bomba de calor modelo Mini Split Xpower Inverter de la marca Carrier .	37
16 Eficiencia en la conversión de energía por kilovatio entre los dos equipos.....	39
17 Consumo de energía eléctrica en kWh/habitante	40
18 Emisiones de GEI asociados a la generación de energía eléctrica en Guatemala 2022 (Ton CO2 e).....	41

RESUMEN

Según el Informe de Estado Global de Edificios y Construcción realizado por el Programa del Medio Ambiente de la Naciones Unidas para el año 2022, el sector de los edificios y la construcción representó alrededor del 37 % de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía y más del 34 % de la demanda de energía a nivel mundial en el año 2021. Esto significa que el sector de la construcción es uno de los que más contaminan a nivel mundial en comparación de otras industrias, no solo en el proceso constructivo del edificio sino también en el mantenimiento y funcionamiento del mismo. Es aquí donde comienza la lucha contra el calentamiento global y el cambio climático dentro de este sector. Uno de los factores más importantes a considerar en el funcionamiento de un edificio es el de la climatización de espacios donde, para la gran mayoría de edificios en países en vías de desarrollo como Guatemala, se emplean aires acondicionados y sistemas de calefacción antiguos que utilizan una gran cantidad de electricidad o combustibles fósiles para su funcionamiento.

En vista de lo anterior es de suma importancia reducir las emisiones de carbono en las edificaciones para tener sistemas de climatización más eficientes y amigables con el medio ambiente. Teniendo en cuenta las cifras mencionadas anteriormente en el Informe de Estado Global de Edificaciones y Construcción, las bombas de calor representan una alternativa ideal para la climatización de espacios ya que pueden funcionar con energías renovables o limpias y eliminar el uso de combustibles fósiles para su funcionamiento. De igual manera existen ahorros significativos en los costos relacionados al uso de la electricidad.

A continuación, se presenta una investigación sobre las bombas de calor, así como un análisis comparativo de implementar estos sistemas como sistema de climatización para un apartamento ubicado en la Ciudad de Guatemala, en comparación con un sistema de aire acondicionado tradicional. Se analiza el proceso de instalación de una bomba de calor, los sistemas de monitoreo y control, así como la comparación con los demás sistemas en el mercado con el fin de demostrar las ventajas de implementar las bombas de calor como sistemas sostenibles de climatización en edificaciones y residencias.

ABSTRACT

According to the Global Status Report on Buildings and Construction conducted by the United Nations Environment Programme for the year 2022, the buildings and construction sector accounted for about 37 % of energy-related CO₂ emissions and more than 34 % of global energy demand in 2021. This means that the construction sector is one of the biggest polluters globally compared to other industries, not only in the building construction process but also in the maintenance and operation of the building itself. This is where the fight against global warming and climate change begins within this sector. One of the most important factors to consider in the operation of a building is the air conditioning of spaces where, for the vast majority of buildings in developing countries like Guatemala, old air conditioners and heating systems that use a lot of electricity or fossil fuels are used.

As mentioned above, it is of utmost importance to decarbonize buildings in order to have more efficient and environmentally friendly air conditioning systems. Taking into account the statistics mentioned above in the Global Status Report on Buildings and Construction, heat pumps represent an ideal alternative for air conditioning of spaces as they can operate with renewable or clean energy and eliminate the use of fossil fuels for its operation. Likewise, there are significant savings in costs related to the use of electricity.

Next, an in-depth research on heat pumps will be presented, as well as a comparative analysis of implementing these systems as an air conditioning system for an apartment located in Guatemala City, compared to a traditional air conditioning system. It will analyze the installation process of a heat pump, monitoring systems, control and energy storage, as well as the comparison with other systems on the market in order to demonstrate the advantages of implementing heat pumps as sustainable air conditioning systems in buildings and residences.

I. INTRODUCCIÓN

Según el Reglamento de Instalaciones Térmicas de la Edificación (RITE) se entiende por climatización a el proceso de llevar las condiciones de temperatura, humedad relativa, calidad del aire y, en ocasiones, incluso de presión, que son necesarias para la salud humana y/o la conservación de ciertos elementos, en un espacio cerrado. La generación de calefacción y refrigeración, conocida comúnmente como aire acondicionado, es necesaria para la producción de climatización de los ambientes.

Según Girón (2017), la refrigeración se trata de un proceso termodinámico que tiene que ver con la obtención de calor. El objetivo es extraer el calor y transferirlo hacia otros lugares del edificio. Mientras que la calefacción permite elevar la temperatura de determinado ambiente en relación con la temperatura exterior para generar condiciones cómodas para las personas en dicho ambiente, es decir, combatir el frío y permitir un grado elevado de calidad de vida.

El Factor de Eficiencia Energética (EER) mide la eficiencia con la que funcionará un acondicionador de aire para una habitación a una temperatura exterior específica. Así mismo, existe también el Coeficiente de Eficiencia Energética Estacional (SEER) el cual mide la relación entre la potencia de refrigeración de un aire acondicionado y una bomba de calor durante una temporada de refrigeración típica, dividida por la energía que utiliza en vatios-hora. Cuanto mayor sea el SEER, más eficiente será el equipo (PennState, 2022). En vista de lo anterior, a lo largo del tiempo se han creado diversos sistemas de climatización como los aires acondicionados convencionales, cuyo factor de eficiencia ronda en 8.5, mientras que el de una bomba de calor puede estar entre 13 hasta 25 (J.A. Berstch, 2021). En Guatemala, la mayoría de sistemas de climatización empleados, como aires acondicionados o sistemas de calefacción, poseen una baja eficiencia lo que resulta en un mayor consumo de energía. Esto es alarmante ya que según el Informe sobre la evaluación de las notificaciones nacionales relacionadas con el artículo 14 de la Directiva sobre eficiencia energética realizado para la Unión Europea aproximadamente el 50 % del consumo final de toda la energía se emplea para calefacción y refrigeración, del cual el 80 % se utiliza en edificios.

Desde el año 2019 se encuentra vigente el Plan Nacional de Eficiencia Energética presentado por el Ministerio de Energía y Minas de Guatemala. El mismo tiene como objetivo fundamental apoyar los esfuerzos del país para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) promoviendo el uso de tecnologías para la eficiencia y el ahorro energético; priorizando el uso de fuentes de energía renovable de manera sostenible para diversificar la matriz de generación de energía eléctrica, así como la sustitución del uso de leña por nuevas fuentes energéticas y tecnológicas, de tal manera que se obtengan beneficios para mejorar las condiciones ambientales utilizando fuentes con bajas emisiones de GEI. Para dar cumplimiento a las metas de reducción de emisiones, dentro del sector energía, el Plan Nacional de Energía, plantea tres ejes estratégicos: 1. Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales, 2. Eficiencia y Ahorro Energético, 3. Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

En consideración con lo anterior, el sector residencial y de construcción no están exentos de tales medidas. En la actualidad, no es suficiente tener solo diseños arquitectónicos inteligentes y respetuosos con el medio ambiente que consideren la orientación, las vistas, el aislamiento y la luz natural para las viviendas. Además, es necesario mejorar los sistemas de climatización para que sean más eficientes debido a su contribución en el uso de energía en los edificios o viviendas.

Actualmente, existe una preocupación mundial por el medio ambiente que ha supuesto una re-

volución en los últimos años en los sistemas de refrigeración y bombas de calor con el objetivo de hacerlos cada día más ecológicos y sostenibles. Debido a esto, se está realizando una amplia investigación para crear sistemas que usen menos energía, sean más efectivos y menos perjudiciales para el entorno.

Las viviendas y los edificios son uno de los factores que contribuyen a un mayor uso de energía en un gran número de países. La eficiencia energética es esencial para lograr los objetivos y dictámenes presentados en el Plan Nacional de Eficiencia Energética. Ante esta problemática, se ha propuesto la implementación de bombas de calor como sistemas de climatización en viviendas y edificios ya que tienen la ventaja de invertir su ciclo de funcionamiento para extraer calor del exterior y calentar el interior en climas fríos, lo que permite tener refrigeración y calefacción en un solo equipo. De igual manera, las bombas de calor trasladan el calor de un lugar a otro, lo que consume menos energía y se traduce en ahorros de hasta el 70 % en costos en comparación con un sistema de calefacción convencional que emplea gas, electricidad, o diésel. Los beneficios y ventajas de utilizar una bomba de calor están directamente relacionados con factores medioambientales como la eficiencia energética, el uso de fuentes de energía renovables, la reducción de las emisiones de dióxido de carbono, el uso de refrigerantes respetuosos con el medio ambiente, etc. (Girón, 2017).

II. ANTECEDENTES

El principio básico del funcionamiento de las bombas de calor fue establecido por Sadi Carnot en 1824, de los conceptos de ciclo y reversibilidad, y por la concepción teórica posterior del británico William Thomson, también conocido como Lord Kelvin, el cual, para el año de 1852, descubrió que el calor puede pasar de un punto frío a uno caliente (AFEC, 2020).

Para poner a prueba esta hipótesis, Thomson diseñó un circuito hermético frigorífico basado en tres principios, cuyo objetivo era conseguir un ambiente confortable. Los principios son que el calor se transmite de una temperatura más alta a una más baja, el cambio de estado del líquido a gas absorbe calor y la presión y la temperatura están directamente relacionadas (AFEC, 2020).

Con base en estos principios, Peter Rittinger fue quien en el año 1856 aplicó esta hipótesis inventando de este modo la Bomba de Calor. El medio ambiente y el ahorro económico fueron las principales razones que llevaron a este ingeniero de minas a desarrollar la bomba de calor. La idea surgió mientras realizaba experimentos sobre el uso del calor latente del vapor de agua para la evaporación de salmuera (AFEC, 2020).

La bomba de calor se empezó a utilizar en Austria para secar la sal en las marismas (terrenos pantanosos que han sido invadidos por las aguas del mar). Posteriormente, en 1857 logró demostrar que con la instalación de la bomba de calor en todas las salinas de Austria sería posible ahorrar hasta 293.000 metros cúbicos de leña (AFEC, 2020).

El desarrollo de los equipos de refrigeración tuvo un rápido crecimiento, en aplicaciones como la conservación de alimentos y el aire acondicionado. A finales de los años cincuenta se inició la expansión de la bomba de calor en Estados Unidos y su producción en serie, con la siguiente evolución en el número de ventas en donde, para el año 1954 representaban 2000 unidades, para el año 1957 eran de 4,0000 unidades, y en el año 1963 las unidades ascendieron a 76,000 (AFEC, 2020).

La crisis del petróleo y el alza de los precios de los combustibles a partir de 1973, impulsó las investigaciones en nuevos equipos de alta eficiencia, además de cambiar el posicionamiento de los costes de calefacción, situación que benefició el desarrollo de la bomba de calor (Ecosistemas S.L, 2015).

A lo largo de estos años además de los cambios coyunturales que han propiciado el aumento de las ventas, las bombas de calor han tenido una evolución positiva desde el punto de vista tecnológico. En un principio, el desarrollo se centró en equipos reversibles aire-aire. El fin principal de estas bombas era la refrigeración, en consecuencia, el diseño estaba orientado a las condiciones del ciclo para obtener frío en verano (Ecosistemas S.L, 2015).

En la actualidad la utilización de bombas de calor se justifica, además del ahorro energético que suponen, por su contribución a la reducción de las emisiones de CO₂. Las bombas de calor consumen menos energía primaria que los medios tradicionales de calefacción y refrigeración (Ecosistemas S.L, 2015).

III. JUSTIFICACIÓN

La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la lucha contra el cambio climático exigen la intervención del sector de la construcción, que es uno de los mayores emisores de contaminación en el mundo en donde, para Guatemala no es la excepción. Por esta razón, es fundamental considerar la descarbonización de los edificios y viviendas, haciendo énfasis en el ámbito de la climatización, para lograr sistemas más sostenibles y eficientes.

El sector de la construcción es uno de los principales sectores que aportan al PIB del país, el cuál ha venido creciendo de manera exponencial en los últimos años. Según un estudio presentado por la Asociación de Desarrolladores Inmobiliarios de Guatemala (ADIG) el total de la huella económica del sector representa 25.3 % del Producto Interno Bruto. En vista de lo anterior, se requiere de especial atención al momento de evaluar el impacto que esta industria tiene para con el medio ambiente.

Como se mencionó anteriormente, el Informe de Estado Global de Edificios y Construcción realizado por el Programa del Medio Ambiente de la Naciones Unidas para el año 2022 señala que el incremento de las emisiones de carbono relacionadas con la energía por parte del sector de la construcción corresponde a que el uso directo de carbón, petróleo y biomasa tradicional fue mayormente reemplazado por el uso de electricidad, que tiene un mayor contenido de carbono debido a la alta proporción de combustibles fósiles utilizados en la generación, por lo que es de suma importancia descarbonizar el sector energético para reducir las emisiones de carbono.

En consideración con la información previa, las bombas de calor representan una excelente solución ante esta problemática ambiental ya que, emplea en su mayoría energías limpias para su funcionamiento y se deshace de los combustibles fósiles permitiendo reducir el uso de energía eléctrica, lo cual es beneficioso para el medio ambiente ya que existe una reducción en las emisiones de CO₂. Otro beneficio de las bombas de calor es que logran ahorrar en costes debido a que tienen la capacidad de transformar una unidad de calefacción o refrigeración que emplea gas o electricidad en tres o más unidades.

Las bombas de calor transforman la energía térmica que se encuentra almacenada en el aire, agua o en el subsuelo en energía de calefacción. De manera inversa, transfieren y enfrían el calor residual del edificio al entorno exterior lo cual permite cubrir las necesidades de calefacción, refrigeración, ventilación y, en algunos casos, de agua caliente con mucha mayor eficiencia energética que otros sistemas tradicionales de calefacción y refrigeración.

Por estas razones las bombas de calor se están convirtiendo en el sistema de elección para el confort sostenible en las edificaciones modernas, ayudando a todo tipo de edificios alrededor del mundo a calentar y enfriar sus espacios al mismo tiempo que reduce los costos de energía, el consumo de energía y la huella de carbono, lo que en última instancia contribuye a reducir el impacto global de los gases de efecto invernadero.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Desarrollar un análisis comparativo de la implementación de bombas de calor como sistema sostenible de climatización frente a un sistema de aire acondicionado tradicional, analizando su funcionamiento, viabilidad, desempeño y beneficios para un apartamento situado en Ciudad de Guatemala.

B. Objetivos específicos

- Comparar el uso de la energía y las emisiones de dióxido de carbono en los sistemas de aire acondicionado tradicionales contra las bombas de calor.
- Determinar las ventajas, desventajas, puntos de mejora, riesgos, mercado, confort de implementar bombas de calor contra un sistema de aire acondicionado tradicional.
- Realizar un análisis costo-beneficio de implementar bombas de calor, así como los posibles ahorros que se puedan dar en comparación con un sistema de aire acondicionado tradicional.
- Establecer una guía preliminar con recomendaciones sobre el proceso de instalación, monitoreo y control de una bomba de calor aire - aire.

V. MARCO TEÓRICO

Sin importar el espacio ocupado por una persona, la calidad del aire es esencial para la salud, así como garantizar el confort dentro de un espacio. Para ello, contar con un buen sistema de climatización es crucial. La climatización consiste en preparar el aire mediante unas condiciones de temperatura, humedad y limpieza adecuadas para el bienestar de las personas dentro de los edificios según la estación del año, esto es, calefacción en invierno y refrigeración en verano (Sánchez, 2015). Según la Sociedad Americana de Meteorología la ventilación normal se encuentra entre temperaturas del aire de aproximadamente 17 °C y 24 °C con una humedad relativa del 70 %, y 19 °C con una humedad relativa del 30 %.

De igual manera, la importancia de la climatización no solo radica en lograr el mayor confort, sino también, la industria del frío juega un papel fundamental en la alimentación, la salud y la confortabilidad, y los equipos más eficientes logran no solo mejorar la calidad de vida de la población, sino también proteger el medio ambiente (Del Amo, 2021).

Mantener la calidad del aire interior en los hogares, la cadena de frío para la preservación de alimentos y medicamentos, o la refrigeración en las telecomunicaciones para poder tele- trabajar, son algunos de los objetivos fundamentales de la climatización, es por ello que es importante desarrollar soluciones que lleven a cabo un uso responsable de los recursos y que se traduzca en un menor impacto en el entorno, es decir, desarrollar soluciones eficientes que garanticen un aire de calidad en el interior de los espacios y proporcionen el mayor confort con el menor consumo de energía posible tanto para el sector residencial como para el sector comercial e industrial (Del Amo, 2021).

A. Fuentes de energía renovable

Según el programa de “Acción por el clima” de las Naciones Unidas, las energías renovables son un tipo de energías derivadas de fuentes naturales que llegan a reponerse más rápido de lo que pueden consumirse, siempre y cuando el consumo por parte de los seres humanos sea responsable y medido. Un ejemplo de estas fuentes son la radiación solar y el viento; estas fuentes se renuevan continuamente. Las fuentes de energía renovable abundan y se encuentran en cualquier entorno (Wiese, 2022).

Otro tema importante es el de sostenibilidad ambiental el cual es el equilibrio generado por la relación armónica entre el ser humano y la naturaleza que lo rodea y de la cual forma parte, y que esta relación permanezca estable a lo largo del tiempo, es decir, sea sustentable (Wiese, 2022).

- 1. Energía eólica.** La energía eólica es la energía que se obtiene a través del viento. Se trata de un tipo de energía cinética producida por el efecto de las corrientes de aire. Esta energía se puede transformar en electricidad a través de un generador eléctrico. Es una energía renovable, limpia y que ayuda a reemplazar la energía producida a través de los combustibles fósiles (Factorenergía, 2018).

- 2. Energía solar.** La energía solar es la energía contenida en la radiación del Sol. Este tipo de energía renovable se genera mediante reacciones de fusión nuclear en el Sol. La radiación viaja hacia la Tierra mediante la radiación electromagnética y, posteriormente, puede ser aprovechada en forma de energía térmica o energía eléctrica. El panel solar es el elemento encargado de captar la radiación solar y transformarla en energía útil. Los paneles solares pueden ser de distintos tipos dependiendo del mecanismo escogido para el aprovechamiento de la energía solar, ya sea a través de captadores solares térmicos, paneles solares fotovoltaicos o simplemente sin ningún elemento externo (Hilcu, 2021).
- 3. Energía hidráulica.** La energía hidráulica es la obtenida del agua en movimiento. La fuerza del agua se transforma en energía mecánica al mover las aspas de una turbina en una central hidroeléctrica, donde se transforma en energía eléctrica (MEM, 2020).
- 4. Energía geotérmica.** La energía geotérmica, también llamada geotermia, se trata de una energía renovable cuya obtención se da mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra que se transmite a través de los cuerpos de roca caliente o conducción y convección, donde tienen que ver también procesos de interacción de agua subterránea y rocas, los cuales dan origen a los sistemas geotérmicos (Sánchez, 2015).

B. Unidad de aire acondicionado tradicional

Los aires acondicionados de refrigeración por compresión (los sistemas más utilizados en equipos de aire acondicionado doméstico y comercial) basan su funcionamiento en el ciclo frigorífico en donde se extrae el calor del aire del lugar que se quiere climatizar. En los circuitos frigoríficos se da la circulación de un gas refrigerante que recorre un circuito de tuberías de cobre cambiando de estado de gaseoso a líquido y de líquido a gaseoso dependiendo en donde atraviese los distintos componentes de este. El intercambio térmico que se da para lograr extraer el calor que sobra en el área que se desea climatizar se da gracias a ese cambio de estado por el que pasa el refrigerante en donde se consigue disminuir la temperatura del ambiente (Arnabat, 2016).

C. Principales componentes de un sistema de aire acondicionado

- 1. Unidad interior - Evaporador.** Esta unidad es la que contiene el evaporador, en el cual sucede el proceso de extracción del aire caliente, que cede su calor al gas refrigerante. Mediante un ventilador que se encuentra dentro de la unidad interior se distribuye el flujo de aire refrigerado al área a climatizar. Así mismo, esta unidad contiene sensores de temperatura conectados al termostato (Arnabat, 2016).
- 2. Válvula de expansión.** Libera al gas refrigerante de la presión a la cual se encuentra sometido en donde, al atravesarla cambia de estado líquido a gaseoso (Arnabat, 2016).
- 3. Unidad exterior – Condensador.** La unidad exterior es la que contiene el condensador y el compresor en donde el gas refrigerante cambia de estado gaseoso a líquido. Es desde esta unidad donde se expulsa el aire caliente extraído del ambiente al exterior (Arnabat, 2016).

4. **Compresor.** El compresor genera una fuerza que comprime el gas que llega del evaporador en estado gaseoso. La presión generada aumenta la temperatura del gas el cual vuelve a su estado líquido. Este elemento es uno de los más importantes del sistema y es el que más energía consume. Los compresores emplean motores de diferentes clases: eléctricos, de gas, diésel y turbinas de gas y vapor. Las unidades más pequeñas de aire acondicionado normalmente utilizan compresores recíprocos o de espiral y condensadores enfriados por aire (Arnabat, 2016).
5. **Gas refrigerante.** Se trata del fluido utilizado para los intercambios de energía en los sistemas de refrigeración, así como en bombas de calor. El refrigerante absorbe calor mientras cambia de fase (de líquido a gas) en el evaporador; a continuación, se comprime, aumentando con esto su temperatura y presión; después pasa al condensador, en donde transfiere su energía directamente a la atmósfera o a un medio que se pretende calentar (Arnabat, 2016).
6. **Termostato.** El termostato es el encargado de regular el funcionamiento del equipo y apagarlo cuando se alcanza la temperatura deseada. Es un componente electrónico fundamental para asegurar la eficiencia del aparato ya que permite usarlo sólo cuando realmente es necesario (Arnabat, 2016).

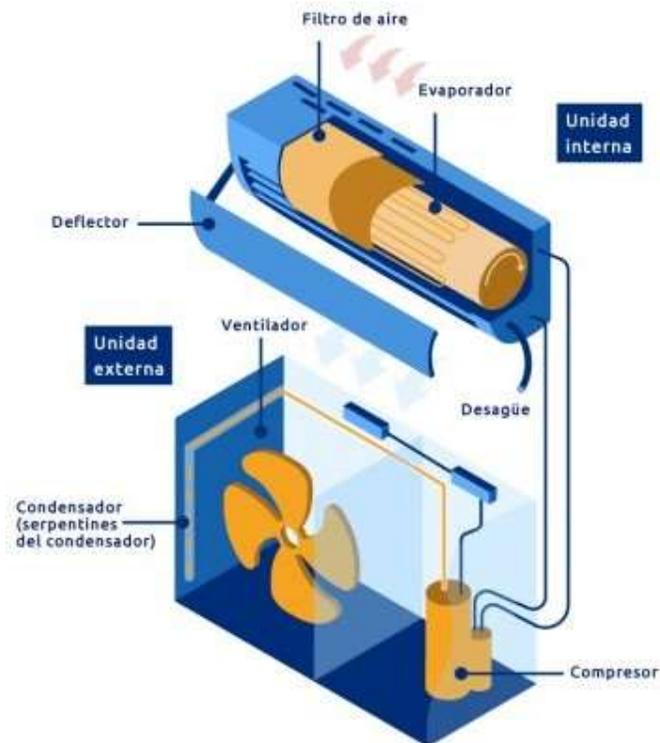


Figura 1. Partes de un aire acondicionado convencional (González, 2023)

D. Sistemas de calefacción tradicionales:

1. **Radiadores:** La calefacción por radiadores basa su funcionamiento en la circulación de agua caliente a través de tuberías. El agua se calienta en una caldera, y se traslada por tuberías a cada radiador que se encuentre en la vivienda. Los radiadores ubicados en las habitaciones calientan el ambiente por convección natural, por lo que, generalmente, están ubicados cerca del piso. El aire se calienta al entrar en contacto con la superficie del radiador y dado a que se torna más liviano asciende, por otra parte, el aire frío baja y pasa a través del radiador nuevamente generando un calor envolvente. Es importante mencionar que para el control de la temperatura en el ambiente se colocan termostatos en el sistema (PEISA, 2021).
2. **Calefacción por suelo radiante:** Los sistemas de climatización por suelo radiante basan su funcionamiento en una red de tubería plástica que, instalada bajo el pavimento y de una capa de mortero, hace circular agua caliente (o fría) por toda la superficie, lo que provoca que el calor o el frío se irradie desde el suelo. En el caso de la calefacción, esto hace que la temperatura del aire a la altura de los pies sea algo superior a la temperatura del aire a la altura de la cabeza, mejorando la sensación de confort (Arnabat, 2022).

El agua a baja temperatura, entre 30 y 45°C, circula desde la caldera por estas cañerías y calienta el mortero, material que recubre a los mismos, llevando la temperatura del piso al- rededor de unos 26°C. Así, el piso caliente cede su calor al ambiente por radiación. Los circuitos de cañerías se distribuyen a los distintos ambientes desde el colector de distribución, que permite regular el caudal de cada circuito para asegurar una temperatura pareja en los distintos ambientes (PEISA, 2021).

3. **Calentadores de agua:** Un calentador de agua, también llamado boiler, es un dispositivo que utiliza cierto tipo de energía para calentar el agua, por medio de un proceso termodinámico. El calentador de agua se utiliza en distintos lugares como en áreas residenciales, comerciales e industriales. Tiene la función de elevar la temperatura del agua utilizando energía. La energía que utiliza un calentador de agua puede provenir de combustibles como el gas natural, gas LP, carbón, etc. Cabe destacar que los calentadores de agua almacenan agua caliente en un tanque y disponible en todo momento (H20TEK, 2023).
4. **Calentadores de paso:** A diferencia de los calentadores de agua, estos calentadores no requieren almacenar el agua proveniente de la red municipal o de un tinaco, sino que utilizan un sistema de calentamiento inmediato el cual permite que, al circular el agua a través del equipo, eleve la temperatura según el requerimiento. Un calentador de paso instantáneo tiene más eficiencia energética que uno tradicional porque no mantiene un piloto encendido todo el tiempo, lo que genera menos emisiones de gas al ambiente y por consiguiente menos contaminación (HidroDinámica, 2013).

E. Bombas de calor

El término bombas de calor significa sistema en el que el equipo de enfriamiento se utiliza para transportar calor del condensador al espacio acondicionado cuando se requiere calefacción y para transportar calor desde este espacio hasta el evaporador cuando se requiere enfriamiento y deshumidificación. El ciclo térmico es idéntico al de la refrigeración ordinaria, excepto que también puede proporcionar calefacción cuando se requiere. En algunas aplicaciones se utiliza al mismo tiempo tanto el efecto de calefacción como el de refrigeración obtenidos en el ciclo (McQuiston, Parker, y Spitler, 2008).

F. Tipos de bombas de calor

1. **Bombas aire-aire.** El tipo más común es la bomba de calor aire-aire. Este modo de funcionamiento es particularmente adecuado para las bombas de calor integradas en el equipo, y ya han sido ampliamente utilizadas en edificios residenciales y en comercios pequeños. El aire exterior constituye la fuente y el vertedero de calor para las bombas de calor. La capacidad de una bomba de calor aire-aire depende en gran medida de la temperatura exterior (McQuiston, Parker, y Spitler, 2008).

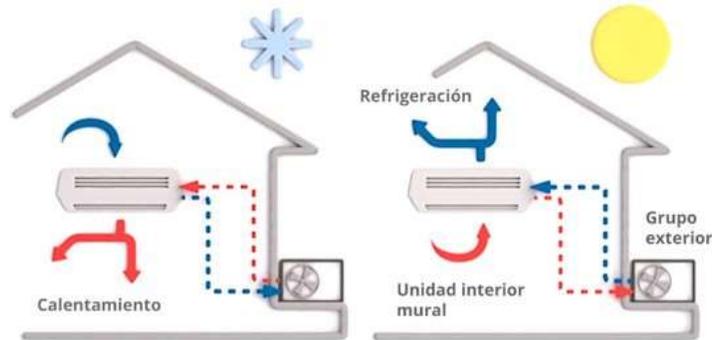


Figura 2. Diagrama de una bomba aire-aire (Silvia, 2019)

2. **Bombas aire-agua.** Los sistemas basados en bombas de calor aire-agua aprovechan la energía del aire ambiente para convertirla en frío, calor y agua caliente sanitaria. En modo calefacción, las bombas de calor aire-agua toman el calor del aire exterior y lo transfieren a un circuito de agua, que puede ser distribuido a otros sistemas como radiadores, unidades de tratamiento de aire, suelo radiante etc. que a su vez ceden el calor del agua al ambiente. En modo refrigeración, en el intercambiador exterior se cede el calor del agua al aire mediante, y en el intercambiador interior se absorbe el calor del ambiente calentando el agua (Arnabat, 2015).

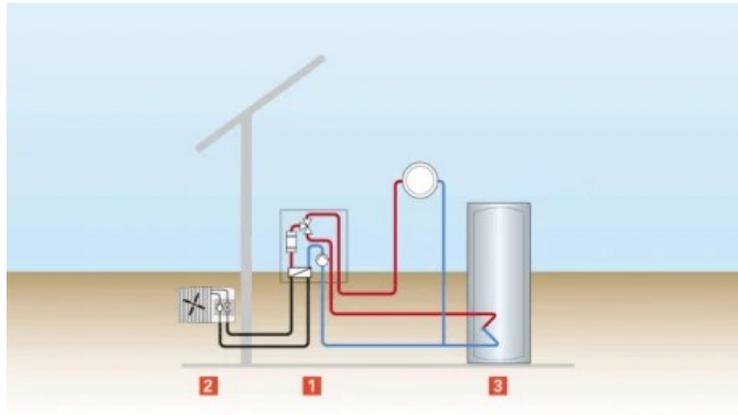


Figura 3. Diagrama de una bomba aire-agua (Viessmann, 2018)

- 3. Bombas agua-aire.** Las bombas agua-aire utilizan agua como fuente y vertedero de calor, y aire como medio para transmitir calor hacia y desde el espacio acondicionado. El agua es una fuente de calor satisfactoria e ideal en la mayoría de los casos. El agua de pozo es particularmente atractiva debido a que su temperatura es relativamente alta y constante. Sin embargo, no siempre se puede disponer de este recurso, lo que limita la aplicación de este tipo de sistema (McQuiston, Parker, y Spitler, 2008).

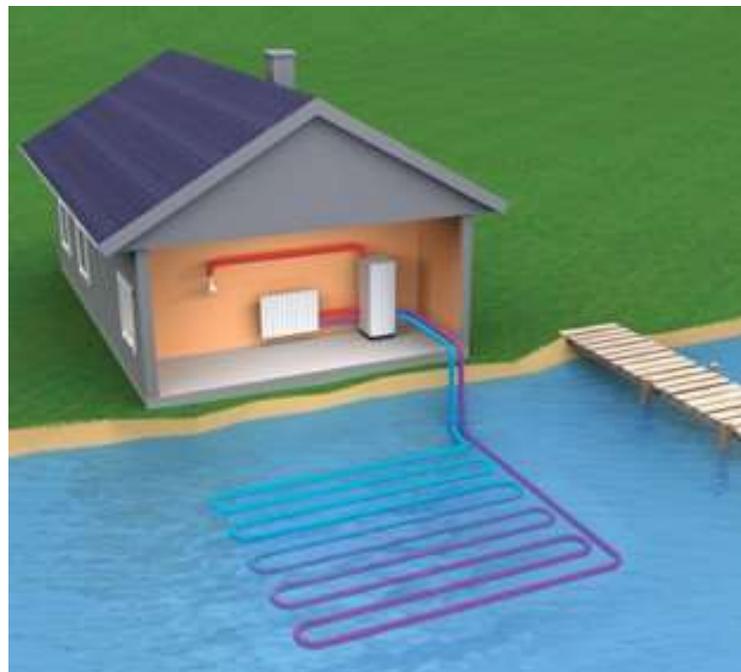


Figura 4. Diagrama de una bomba agua-aire (Gumarov, 2019)

4. **Bombas de calor geotérmicas.** Dentro de los distintos tipos de bombas de calor que existen destacan las geotérmicas las cuáles aprovechan la energía geotérmica, es decir, el calor constante del suelo durante todo el año, como fuente natural de energía. La energía que alimenta los procedimientos geotérmicos de generación procede del calor existente en el interior de la tierra. Un calor que está presente en rocas, suelo o aguas subterráneas y que procede de capas aún más inferiores. La captación del calor del subsuelo se realiza mediante sondas o tuberías con líquido anticongelante que se entierran y recogen la temperatura del subsuelo y la llevan a la bomba de calor geotérmica (González, 2021).

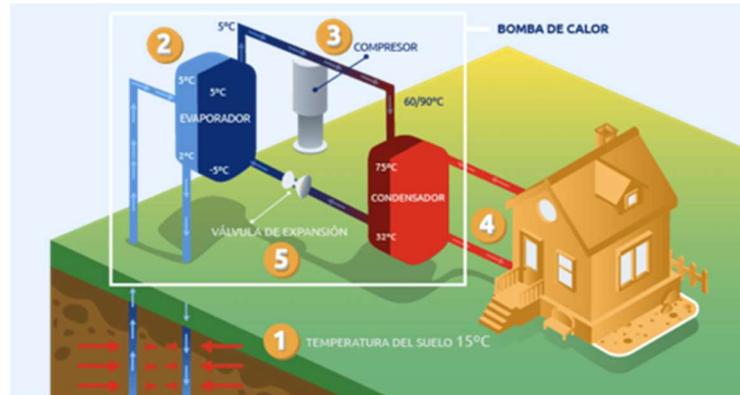


Figura 5. Diagrama de una bomba geotérmica (González, 2021).

G. Principio de funcionamiento de las bombas de calor

En el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante entra en el compresor como gas y se comprime a la presión del condensador. Sale del compresor a una temperatura relativamente alta y se enfría y se condensa a medida que fluye a través de los serpentines del condensador al rechazar calor al medio circundante. Luego, el refrigerante ingresa a un tubo capilar o una válvula de expansión donde su presión y temperatura descienden drásticamente debido al efecto de estrangulamiento. El refrigerante a baja temperatura luego ingresa al evaporador, donde se evapora absorbiendo el calor del espacio refrigerado. El ciclo se completa cuando el refrigerante sale del evaporador y vuelve a entrar en el compresor (Cengel y Boles, 2004).

Los refrigeradores y las bombas de calor funcionan en el mismo ciclo, pero difieren en sus objetivos. El objetivo de un frigorífico es mantener el espacio refrigerado a baja temperatura extrayéndole calor. Por el contrario, el objetivo de una bomba de calor es mantener un espacio calentado a alta temperatura. Esto se logra absorbiendo el calor de una fuente de baja temperatura, como el agua, el suelo o el aire exterior frío en invierno, y suministrando este calor al medio de alta temperatura, como un edificio. Las bombas de calor, si son reversibles, también pueden funcionar como refrigerador o aire acondicionado, extrayendo el calor de una habitación o de un edificio durante la temporada de verano y liberándolo al ambiente exterior. La Figura 6 ilustra un refrigerador (a) y una bomba de calor (b) operando en un ciclo termodinámico (Cengel y Boles, 2004).

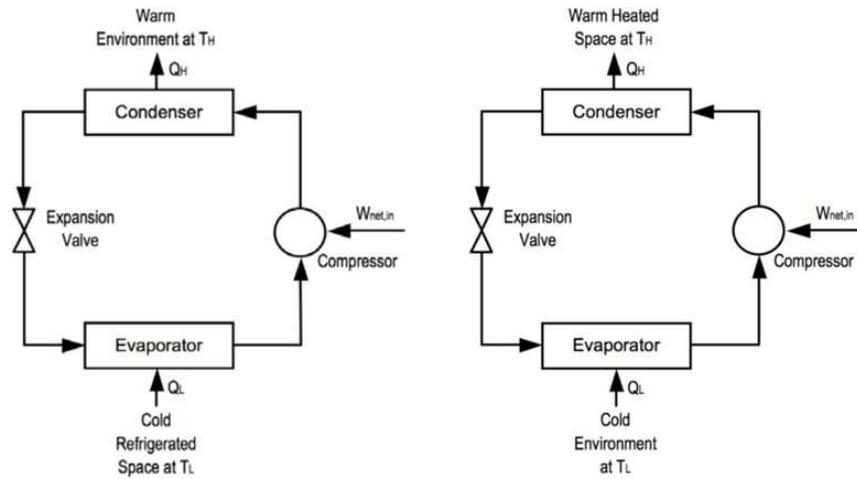


Figura 6. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor: a) Refrigerador, b) Bomba de calor (Cengel y Boles, 2004).

Por lo tanto, el objetivo principal de una bomba de calor es proporcionar tanta calefacción como refrigeración en un solo dispositivo. En el modo de calefacción, la bomba de calor toma el calor del aire exterior y lo libera en el interior. Durante este proceso el refrigerante, el cual es el fluido que permite los intercambios de calor dentro del equipo, se encuentra a una temperatura elevada en la unidad interior por lo que libera dicho calor al recinto, luego el refrigerante viaja a la válvula de expansión en donde disminuye su presión y temperatura para luego viajar a la unidad exterior en donde absorbe el calor del aire exterior, aún en bajas temperaturas, de donde viaja hacia el compresor, pasando por la válvula de inversión. En el compresor, el refrigerante aumenta su presión y por lo tanto su temperatura y llega a una temperatura elevada a la unidad interior, en donde libera dicho calor para mantener el recinto a una temperatura confortable y se repita el proceso.

En modo refrigeración ocurre lo mismo, pero de manera inversa, estos cambios en la dirección del flujo del refrigerante se dan gracias a la válvula de inversión. La válvula de inversión se ubica a lo largo de los tubos que conectan los principales componentes operativos de la bomba de calor ayuda a dirigir el flujo de refrigerante a través de estas tuberías. Cuando la válvula de inversión está configurada en modo de calefacción, el condensador y el evaporador cambian automáticamente de función, de modo que el evaporador ahora se encuentra en el exterior mientras que el condensador está en el interior (Government of Canada, 2022).

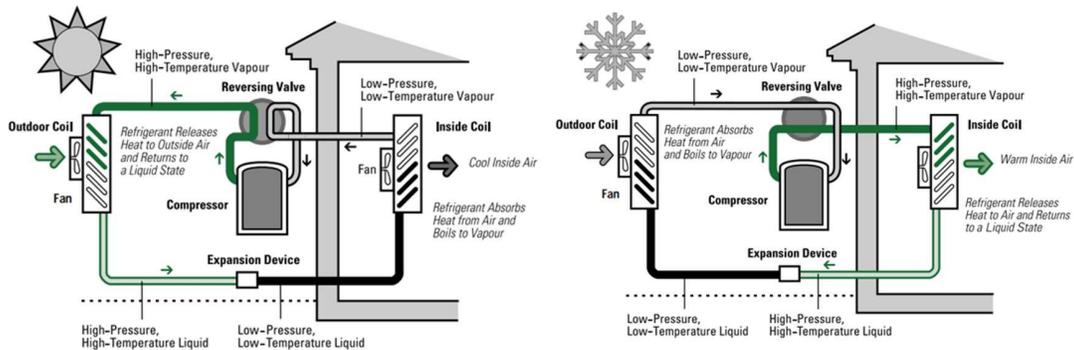


Figura 7. Principio de funcionamiento de una bomba de calor (Government of Canada, 2022).

H. Componentes básicos de una bomba de calor

1. **Compresor:** Absorbe el gas refrigerante procedente del evaporador a baja presión y lo cede al condensador elevando su presión y por lo tanto también su temperatura, es decir comprime y calienta el gas procedente del evaporador. Cuando se cuenta con una mayor temperatura se realizará mejor la transmisión de su calor al aire en el condensador (Espiñeira, 2022).
2. **Condensador:** Al condensador le llega el gas refrigerante en alta presión y caliente procedente del compresor. El refrigerante que circula por el condensador, al estar en contacto con el aire exterior a través del serpentín del condensador, cede su calor al aire exterior haciendo que este se caliente. El refrigerante que cede su calor al aire se calienta y pasa a un estado líquido a su salida. En este proceso el aire exterior se calienta y el líquido refrigerante se enfría (Espiñeira, 2022).
3. **Válvula de expansión:** Sirve para regular la entrada del refrigerante líquido al evaporador procedente del condensador. En la válvula de expansión el refrigerante llega frío y con un estado líquido. Al pasar por la válvula el líquido se expande y se enfría, preparándolo para que en el evaporador tenga una transmisión de calor mejor del aire al refrigerante (Espiñeira, 2022).
4. **Evaporador:** El evaporador es un intercambiador de calor en el que se produce el cambio de fase del refrigerante de líquido a vapor, absorbiendo calor. En otras palabras, el líquido refrigerante llega al evaporador en baja presión y frío después de pasar por la válvula de expansión (Espiñeira, 2022).

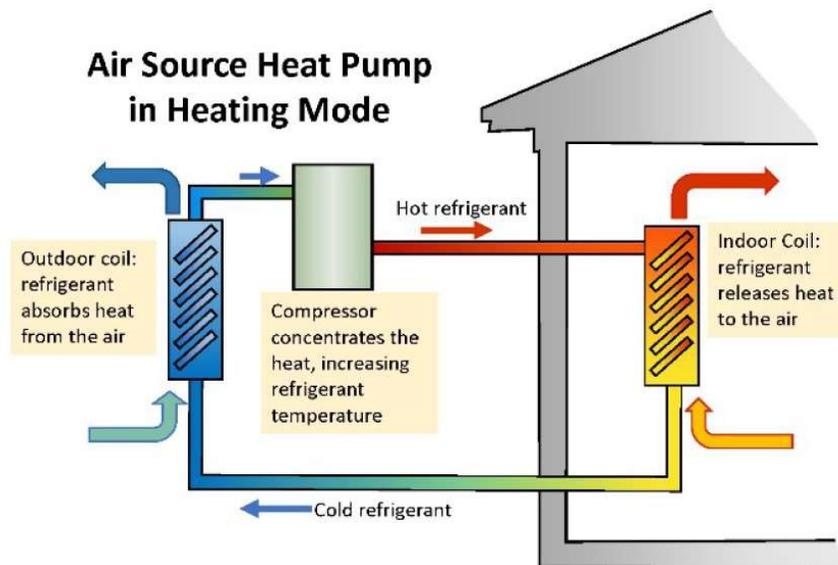


Figura 8. Diagrama de un sistema de bomba de calor aire - aire (Neep, 2020).

I. Bombas de calor para la climatización sostenible de espacios

Alrededor de todo el mundo se ha dado un gran enfoque al sector de la calefacción con varios estudios para evaluar el potencial de ahorro de energía y emisiones, así como la introducción renovable en el sector de la climatización. Más específicamente para el sector de la construcción, varios estudios han presentado las bombas de calor como una tecnología muy prometedora para contribuir a la descarbonización del sector de la construcción y disminuir el consumo de energía primaria para la demanda de calor y frío alrededor del mundo. A continuación, se presenta una de las conclusiones más importantes de varios estudios en donde se comprueban los beneficios de las bombas de calor como sistemas de climatización (Duarte, 2015).

Nishio y Hoshino (2010), estimaron un potencial de reducción del 52 % de las emisiones de CO₂ de la calefacción de espacios residenciales y el calentamiento de agua si las tecnologías existentes (calderas de gas y petróleo, así como aparatos eléctricos de baja eficiencia como la calefacción por resistencia) fueran reemplazadas por tecnologías de bombas de calor. Algo interesante es que este estudio se llevó a cabo en los siete países responsables de un tercio de la cantidad total de CO₂ emitido en todo el mundo (Estados Unidos, Japón, Canadá, Alemania, Reino Unido, Italia y Francia).

J. Intercambiadores de calor

Un intercambiador de calor es un equipo que transfiere continuamente calor de un medio a otro. Hay dos tipos principales de intercambiadores de calor: directos e indirectos. Con un intercambiador de calor de placas, el calor puede separar fácilmente el medio caliente del medio frío, ya que puede llegar a la superficie.

En consecuencia, es posible calentar o enfriar gases o fluidos con bajos niveles de energía. Varios principios fundamentales gobiernan la teoría de la transmisión de calor de un medio o fluido a otro: Un medio caliente siempre transferirá calor a uno frío, los medios siempre deben estar a diferentes temperaturas y, la cantidad de calor que pierde el medio caliente es igual a la cantidad de calor que recibe el medio frío exceptuando las pérdidas al medio ambiente (AlfaLaval, 2022).

1. **Intercambiador de calor directo:** Se trata de aquellos donde ambos medios están en contacto directo entre sí. Se da por sentado que los medios no se mezclan. Un ejemplo de este tipo de intercambiador de calor es una torre de enfriamiento, donde el agua se enfría a través del contacto directo con el aire (AlfaLaval, 2022).
2. **Intercambiador de calor indirecto:** Son aquellos donde ambos medios están separados por una pared a través de la cual se transfiere el calor (AlfaLaval, 2022).

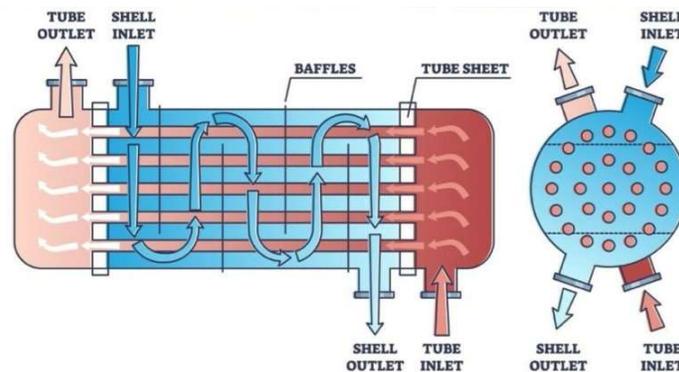


Figura 9. Diagrama Intercambiador de calor (AlfaLaval, 2022).

K. Consideraciones de seguridad y mantenimiento

Las bombas de calor están diseñadas para funcionar de manera eficiente durante 15 años o más, dependiendo del tipo. Estas requieren mantenimiento regular y programado. El encargado de instalar debe dejar por escrito los detalles de cualquier mantenimiento que requiera la máquina y, de igual manera, asegurarse que todo funcione correctamente luego de la instalación. El proveedor debe comunicar los requisitos exactos de mantenimiento antes de comprometerse a instalar una bomba de calor. A continuación, se mencionan algunos de los mantenimientos típicos tanto de las unidades interiores como exteriores que se deben de realizar para el óptimo funcionamiento de la bomba de calor (Whirpool, 2003).

1. **Unidades interiores:** Limpieza de la unidad, comprobación de las temperaturas de encendido/apagado de calefacción y enfriamiento, conexiones eléctricas sanas y salvas, filtro de agua, presión de agua y presión del vaso de expansión, válvula de 3 vías cambio de calefacción a enfriamiento, caja de interruptores, encendido/apagado del calentador de refuerzo, si corresponde (Whirpool, 2003).

- 2. Unidades exteriores:** Limpiar la unidad, especialmente la bobina ya que la suciedad, como las telarañas, el polvo, etc. pueden tener un efecto negativo sobre la eficiencia de la bomba de calor, las aletas deben ser limpiadas con agua y jabón sin otras sustancias químicas. Revisar continuamente que las conexiones eléctricas se encuentren en buen estado (Whirpool, 2003).

L. Beneficios de la bomba de calor

Entre los principales beneficios de las bombas de calor se encuentran los bajos costos de funcionamiento los cuales ayudan a reducir las facturas de energía de lugar donde se empleen. Así mismo, las bombas de calor funcionan con electricidad (la cual se puede generar de fuentes renovables como la energía solar) y producen menos emisiones de gases de efecto invernadero, lo que las hace mucho más amigables con el medio ambiente que los sistemas de calefacción tradicionales (Vaillant, 2022).

La utilización de fuentes de energía naturales como el aire, el suelo y el agua significa que el enfoque de la producción de calefacción y agua caliente es particularmente sostenible. De igual forma, las bombas de calor tienen una larga vida útil. En promedio, la vida útil resulta ser el doble que la de una caldera doméstica típica, las cuales duran alrededor de 10 a 12 años, mientras que las bombas de calor tienen una vida útil promedio de 15 a 25 años. Las bombas de calor tienen un diseño robusto y muy pocas partes móviles, lo que significa que requieren muy poco mantenimiento, especialmente en comparación con el mantenimiento anual que requiere una caldera tradicional (Vaillant, 2022).

Las bombas de calor son increíblemente silenciosas lo que significa que se pueden colocar en cualquier lugar sin causar ninguna molestia por el ruido. Las bombas de calor pueden operar a niveles de alta eficiencia incluso en temperaturas frías. Solo el 25 % de la energía utilizada por una bomba de calor proviene de la electricidad, y el 75 % restante lo genera el medio ambiente a través de la tierra, el agua o el aire (según el tipo de sistema de bomba de calor) (Vaillant, 2022).

M. Condiciones del mercado para bombas de calor

El tamaño del mercado mundial de bombas de calor se estimó en USD 81,580 millones para el año 2022 y se espera que crezca a una tasa de crecimiento anual compuesta del 9,3 % entre 2023 y 2030. Durante este periodo se prevén políticas gubernamentales favorables para solucionar el tema de la eficiencia energética y reducción de la huella de carbono con el objetivo de impulsar el crecimiento del mercado para las bombas de calor. Muchos gobiernos alrededor del mundo están brindando subsidios o incentivos, así como créditos y devoluciones fiscales por la instalación de bombas de calor para ayudar a impulsar aún más la demanda de estos equipos energéticamente eficientes y, por lo tanto, benefician el crecimiento del mercado (Grand View Research, 2022).

En el contexto guatemalteco, dada la poca comercialización de bombas de calor debido a la limitada disponibilidad en el mercado, se podría hacer una equivalencia con la demanda de equipos de aire acondicionado tradicional en el país, con el fin de conocer el potencial mercado. De acuerdo con Tomás Villamar, director de categorías del Grupo Distelsa, Tiendas Max y Tecno Fácil, en general, el mercado de los equipos de aire acondicionado y ventiladores, de pared o móviles, crece entre un 25 % y 30 % cada año. Durante la época de calor es marcado el aumento de la demanda de ventiladores y aire acondicionado, principalmente en la región central del país, mientras que, en otras regiones como el suroccidente y el litoral Pacífico, el calor se mantiene constante durante todo el año.

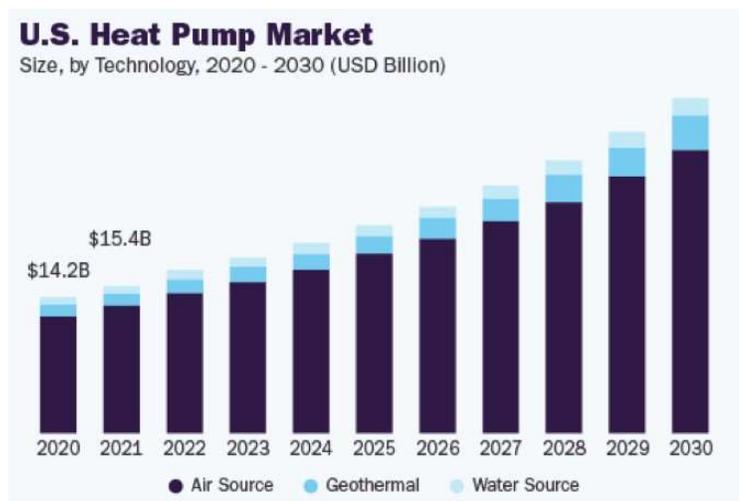


Figura 10. Crecimiento del Mercado de Bombas de Calor en USA (Grand View Research, 2022).

N. Bases de datos comerciales

En Europa, las bombas de calor disfrutaron de un año récord en 2022, con un crecimiento de las ventas de casi un 40 %. Las ventas de unidades aire-agua aumentaron casi un 50 %. En algunos mercados, como Polonia, las ventas crecieron más del 100 %, impulsadas por políticas ambiciosas y esquemas de apoyo. En la UE, también se espera un plan de acción de bomba de calor a finales de 2023 (Biermeier, 2023).

En los Estados Unidos, las ventas de bombas de calor aire-aire crecieron alrededor de un 11 % en 2022, superando las ventas de hornos de gas después de años de crecimiento casi igual (Biermeier, 2023).

Las unidades aire-agua crecieron un 19 % en Japón en 2022, impulsadas principalmente por los calentadores de agua con bombas de calor. A continuación se presenta un gráfico que muestra el crecimiento en ventas de las bombas de calor en diferentes regiones:

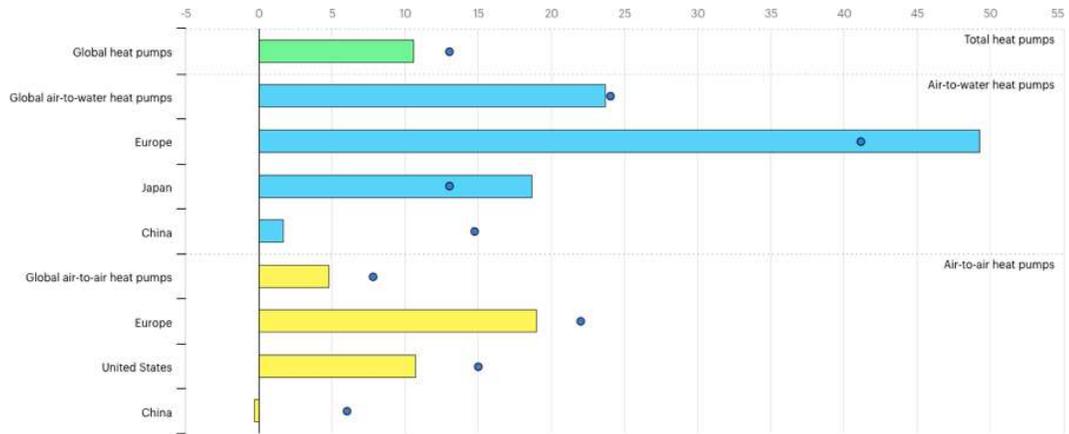


Figura 11. Crecimiento en ventas de las bombas de calor en diferentes regiones

A continuación se presenta una tabla con 5 de las principales marcas dedicadas a la comercialización de bombas de calor aire-aire donde se incluye el costo del sistema, instalación y mantenimiento anual de las bombas de calor. Cabe destacar que los costos pueden variar dependiendo de la región en la que se encuentre, el tipo de edificio y su uso, etc (Biermeier, 2023).

Marca de Bomba de Calor	Costo del Sistema aprox.	Costo de instalación aprox.	Costo de mantenimiento aprox.	Costo total
Frigidaire	\$500-\$1,082	\$262-\$568	\$100-\$200	\$862-\$1850
Goodman	\$1,500-\$8,000	\$671-\$3580	\$100-\$200	\$2271-\$11780
Carrier	\$3,000-\$15,000	\$1591-\$7956	\$100-\$200	\$4691-\$23156
Ruud	\$3,000-\$6,100	\$1667-\$3389	\$100-\$200	\$4767-\$9689
Rheem	\$3,100-\$6,100	\$1722-\$3389	\$100-\$200	\$4922-\$9689

Cuadro 1

Costos totales del sistema, instalación y mantenimiento

Ñ. Consideraciones financieras

Al momento de implementar bombas de calor, ya sea para uso residencial o industrial es de suma importancia tomar en cuenta diversas consideraciones financieras con el objetivo de evaluar qué tan viable es económicamente la inversión y si esta vale la pena. A continuación se mencionan algunas:

1. **Costo inicial.** El costo inicial puede variar mucho dependiendo del tipo, tamaño y marca de la unidad, así como el lugar donde se va a instalar y la cantidad de mano de obra requerida. Tomando en cuenta las bombas de calor aire - aire a continuación se muestra el costo del equipo e instalación aproximado, así como el costo total. Las bombas de calor de fuente de aire son populares debido a su menor costo. Para funcionar, la bomba de calor utiliza el calor del aire exterior (incluso cuando hace frío) para calentar el interior del hogar (Luminita, 2023).

Tipo de bomba de calor	Costo del equipo	Costo de instalación	Costo total
Aire - aire	\$2000 - \$5500	\$4000 - \$8000	\$6500 - \$13500

Cuadro 2
Costos iniciales para una bomba Aire-Aire

2. **Tamaño de la unidad.** Las bombas de calor se pueden encontrar en diferentes tamaños y capacidades (medidas en toneladas y BTU). En general, las casas más grandes requieren bombas de calor más grandes y potentes para climatizar de manera eficiente y adecuada. Por ejemplo, una bomba de calor de 2 toneladas puede costar entre \$2500 y \$ 5000, mientras que una bomba de calor mucho más grande de 5 toneladas puede costar entre \$6000 y \$10 000. A continuación se muestra una tabla que muestra la capacidad mínima necesaria para climatizar un espacio en base a los metros cuadrados (Luminita, 2023):

Espacio (mt2)	Tamaño (Toneladas)	Tamaño (BTU)
46.45	1	12000
92.9	2	24000
139.35	3	36000
185.8	4	48000
232.25	5	60000
278.6	6	72000

Cuadro 3
Tabla de tamaño de la unidad con base en el espacio requerido

3. **Marca del equipo.** Los precios de las bombas de calor nuevas varían según la marca. Bosch, por ejemplo, se encuentra entre las marcas más caras, con sistemas de hasta \$8200, mientras que Coleman se encuentra entre las marcas de bombas de calor más asequibles, y vende unidades por tan solo \$1,200 (Luminita, 2023).

Marca de la bomba de calor	Costo de la bomba de calor
Amana	\$1800 - \$2800
American Standard	\$1700 - \$3600
Bosch	\$1300 - \$8200
Carrier	\$2300 - \$4000
Coleman	\$1200 - \$3800

Cuadro 4

Tabla con costos de una bomba de calor por marca

- 4. Coeficiente de eficiencia.** Existen dos métricas a considerar: Factor de rendimiento estacional de calefacción (HSPF) y Relación de eficiencia energética estacional (SEER) (Luminita, 2023).

Las bombas de calor de alta eficiencia (19+ SEER y 10+ HSPF) son más costosas, generalmente entre \$7500 y \$10000 completamente instaladas, pero son más eficientes a largo plazo. Esto podría conducir a menores costos de energía en el futuro (Luminita, 2023).

Las bombas de calor estándar (o de baja eficiencia) con clasificaciones SEER y HSPF más bajas pueden mantener bajos los costos de inversión iniciales, generalmente de \$3500 a \$5000 por instalación completa (Luminita, 2023).

O. Uso de energía en las bombas de calor

Las bombas de calor transfieren el calor de un lugar a otro en lugar de generarlo a través de la combustión como una caldera tradicional, lo que hace que las bombas de calor sean una excelente opción para muchos propietarios que buscan una forma eficiente de climatizar sus hogares. De hecho, las bombas de calor pueden ahorrar a los propietarios de viviendas un 40 % aproximadamente en su factura mensual de energía en comparación con un sistema de calefacción tradicional debido a su mayor eficiencia (Ultimate, 2023). Cuando se trata del consumo de energía de la bomba de calor, hay varios factores a considerar, como:

- 1) El tamaño y el modelo de la bomba de calor
- 2) Coeficientes de eficiencia
- 3) El clima donde se instalará

Para compensar el costo de la electricidad, muchos propietarios optan por invertir en paneles solares, ya que complementan bien las bombas de calor y constituyen una inversión inteligente a largo plazo. En este análisis se consideran las bombas de calor aire-aire las cuales son más comunes y tienen un uso moderado de energía (Ultimate, 2023).

En promedio, una bomba de calor aire-aire utiliza entre 545 y 7500 vatios de electricidad. El voltaje por hora se puede calcular dividiendo las unidades térmicas británicas (BTU) necesarias para calentar o enfriar su hogar por el SEER del equipo para los meses cálidos y el factor de rendimiento estacional de calefacción (HSPF) para los meses fríos. A continuación se presenta un aproximado del costo de operación de una bomba de calor en el contexto guatemalteco (Ultimate, 2023).

Considerando Q 1.28/kWh para la Tarifa Social y Q 1.36/kWh para la Tarifa No Social según datos de EEGSA.

Modo	Consumo por hora (kwh)	Consumo por día (kwh)	Consumo por mes (kwh)	Costo de energía (Q/kwh)	Costo de operación al mes (Q)
Refrigeración	0.55-5.14	4.36-41.14	130.91-1234.29	1.36	178.04-1678.63
Calefacción	0.86-9.00	6.86-72	205.71-2160	1.36	279.76-2937.6

Cuadro 5
Tabla con costos de operación por mes

P. Emisiones de gases de efecto invernadero

El uso de energía residencial es responsable de aproximadamente el 20 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) en los EE. UU. El creciente número de viviendas y el uso continuo de combustibles fósiles para la calefacción en los hogares hacen que sea más difícil cumplir con los objetivos de reducción de emisiones. Aunque las bombas de calor eléctricas no tienen combustión en el sitio, existen emisiones asociadas con la generación de electricidad, así como con fugas de refrigerante (Calisch, 2023).

Las bombas de calor recolectan energía térmica varias veces mayor que la cantidad de electricidad que se ingresa para operarlas. Además, el rendimiento de las bombas de calor ha seguido mejorando año tras año y ha disminuido la cantidad de electricidad necesaria para recoger la misma cantidad de calor. Como resultado, las bombas de calor permiten utilizar una cantidad de energía térmica muy superior a la cantidad de energía primaria que se introduce en las centrales eléctricas, aunque se tenga en cuenta la pérdida en el momento de la generación de energía (Calisch, 2023).

Las bombas de calor han superado en gran medida el límite de eficiencia de los equipos convencionales basados en combustión que no pueden producir una energía térmica mayor que la cantidad de energía primaria introducida por debajo del límite de eficiencia térmica del 100 % (Calisch, 2023).

Las bombas de calor altamente eficientes consumen una pequeña cantidad de electricidad reduciendo las emisiones de CO₂. Esta cantidad de CO₂ es mucho menor que la cantidad de CO₂ emitida por la quema directa de combustibles fósiles con equipos de combustión convencionales para calefacción (Calisch, 2023).

Las emisiones de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono provenientes de las bombas de calor están determinadas por diferentes factores:

- 1) La cantidad de electricidad necesaria para hacer funcionar la bomba de calor
- 2) La intensidad de carbono de la electricidad local.
- 3) Las fugas de los refrigerantes utilizados para hacer funcionar la bomba de calor (Calisch, 2023).

Q. Estándares gubernamentales o de la industria

1. Estándares de eficiencia energética: La mayoría de países donde se comercializan más las bombas de calor cuentan con estándares y etiquetas de eficiencia energética para estos dispositivos. Por ejemplo:

a. Estados Unidos: La Administración de Información de Energía (EIA) establece estándares de eficiencia para bombas de calor y demás equipos de calefacción y refrigeración. De igual manera, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) administra el programa ENERGY STAR, que certifica productos de alta eficiencia energética, incluidas las bombas de calor. Así mismo, el Departamento de Energía (DOE) establece normas de eficiencia mínima para equipos de climatización, incluidas bombas de calor, basado en los estándares de la Ley de Energía y Política de Conservación (Energy Policy and Conservation Act, EPCA)..

b. Unión Europea: las bombas de calor están sujetas a regulaciones y directivas que establecen requisitos de eficiencia energética. La Directiva de Ecodiseño (ErP) y la Directiva de Etiquetado Energético establecen estándares para la eficiencia energética de los productos relacionados con la energía, incluidas las bombas de calor.

c. Guatemala: Actualmente en el país no existen leyes o estándares formales que regulen las bombas de calor, sin embargo, desde el año 2019 se encuentra vigente el Plan Nacional de Eficiencia Energética presentado por el Ministerio de Energía y Minas de Guatemala. El mismo tiene como objetivo fundamental apoyar los esfuerzos del país para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) promoviendo el uso de tecnologías para la eficiencia y el ahorro energético.

2. Normas de seguridad:

- 1) Normas ASHRAE: ASHRAE son las siglas de la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado. Es una asociación de tecnología para edificios con más de 57,000 miembros mundialmente.

La asociación y sus miembros se enfocan en los sistemas de edificios, la eficiencia energética, la calidad del aire interior y la sostenibilidad dentro de la industria. A continuación se menciona algunas de las más importantes:

- a) ASHRAE 15: Estándar de seguridad para sistemas de refrigeración y designación y clasificación de refrigerantes
- b) ASHRAE 34: Designación y Clasificación de Seguridad de Refrigerantes
- c) ASHRAE 40: Métodos de prueba para la clasificación de equipos unitarios de aire acondicionado y bomba de calor que funcionan con calor

2) Normas ISO: Las normas ISO son un conjunto de estándares con reconocimiento internacional que fueron creados con el objetivo de ayudar a las empresas a establecer unos niveles de homogeneidad en relación con la gestión, prestación de servicios y desarrollo de productos en la industria. Algunas de las normas que aplican en la investigación son:

- a) Norma ISO 5149-1:2014: Sistemas de refrigeración y bombas de calor. Requisitos de seguridad y medioambientales.
- b) Norma ISO 5151:2017: Aires acondicionados y bombas de calor sin conductos: pruebas y calificación de rendimiento
- c) Norma ISO 13261-1:1998: Clasificación de potencia acústica de los equipos de aire acondicionado y bomba de calor de fuente de aire. Parte 1: Equipos exteriores sin conductos.
- d) Norma ISO 15042: Aires acondicionados de sistema múltiple y bombas de calor aire-aire: pruebas y calificación de rendimiento.

3. Incentivos y políticas alrededor del mundo:

a. Estados Unidos: Según el Departamento de Energía de los EE. UU., se puede solicitar un crédito fiscal del 30 % por comprar una propiedad en los EE. UU. que tenga bombas de calor certificadas instaladas en conexión con una unidad de vivienda existente o nueva. El gobierno ha proporcionado créditos fiscales personales e incentivos directos en la instalación de estos sistemas, lo que fomenta la instalación de bombas de calor (Zealux, 2018).

b. Dinamarca: El esquema de incentivos de Dinamarca está vigente desde 2020 y ofrece subvenciones tanto para edificios nuevos como para proyectos de renovación. La subvención para bombas de calor aerotérmicas es de hasta 3.338 € y hasta 4.772,9 € para bombas geotérmicas (Zealux, 2018).

c. Reino Unido: El Reino Unido también ha estado ofreciendo subsidios para la adopción de bombas de calor, en particular para los hogares de bajos ingresos. El plan de subvenciones Green Homes del gobierno ofrece hasta £ 5,000 en cupones para que los propietarios instalen bombas de calor. Además, el gobierno del Reino Unido ha anunciado un esquema de incentivos de calor renovable (RHI) que brinda apoyo financiero tanto a los hogares como a las empresas que adoptan tecnologías de calefacción renovables, como las bombas de calor. Este esquema de incentivos ofrece un pago por siete años basado en la cantidad de calor renovable generado por el sistema (Zealux, 2018).

d. Alemania: En Alemania, el gobierno ofrece un subsidio de hasta el 45 % del costo de instalación de una bomba de calor, pero los criterios de elegibilidad son bastante estrictos y el proceso puede ser bastante complicado. El gobierno alemán todavía tiene un "Programa Marktanzreiz"(MAP) que ofrece subsidios para instalaciones de energía renovable, incluidas las bombas de calor. Este programa ofrece incentivos tanto para los hogares como para las empresas, pero el monto del subsidio varía según el tipo de instalación (Zealux, 2018).

R. Requerimientos de espacio

Cuando se elige una ubicación para la unidad exterior de un sistema de bomba de calor de fuente de aire, se debe proporcionar suficiente espacio alrededor de la unidad, en donde se debe considerar que la circulación de aire sea suficiente, exista acceso alrededor de la unidad para mantenimiento y servicio, y espacio para cualquier tubería, conducto o cable de alimentación. El factor principal que dicta los requerimientos de espacio para cualquier bomba de calor serán las pautas establecidas por el fabricante para una unidad específica (James, 2022).

S. Principal diferencia entre un aire acondicionado y una bomba de calor

La mayor diferencia entre una bomba de calor y un aire acondicionado tradicional es que, este último no proporcionan calefacción, a diferencia de las bombas de calor las cuales sí lo hacen. Gracias a una válvula inversora en la unidad exterior, un sistema de bomba de calor funciona extrayendo la energía térmica del aire exterior, incluso en temperaturas extremadamente frías, transfiriendo el calor al interior de la vivienda, donde libera el calor al aire. Un aire acondicionado generalmente se combina con un horno o caldera para proporcionar calor durante los meses fríos. Juntos, un aire acondicionado y un horno son un sistema completo de calefacción y refrigeración (Carrier, 2022).

T. Refrigerantes y su impacto en el medio ambiente

El elemento más nocivo tanto de un aire acondicionado como de una bomba de calor es el refrigerante que se emplea para los intercambios de energía en el sistema. Los refrigerantes más comunes que se han utilizado en los sistemas de aire acondicionado son los hidrofluorocarbonos (HFC) y los clorofluorocarbonos (CFC). El gas refrigerante HFC es la tercera generación de refrigerantes fluorados. Son reconocidos como Potencial de Agotamiento del Ozono (ODP) y Potencial de Calentamiento Global (GWP). A pesar de que se consideran gases de efecto invernadero representan una alternativa más ecológica a los refrigerantes CFC y HCFC ya que, a diferencia de estos, los HFC no contienen cloro, por lo que no destruyen la capa de ozono. Sin embargo, los refrigerantes HFC son potentes gases de efecto invernadero con un alto potencial de calentamiento global (GWP) y largas vidas (ASIRCRA, 2022).

En cuanto a los clorofluorocarbonos (CFC) se trata de sustancias derivadas de los hidrocarburos saturados que se obtienen a través de la sustitución de átomos de hidrógeno por átomos de cloro y flúor. Estos gases son muy dañinos con el medio ambiente ya que no se destruyen en la atmósfera baja, así que logran subir hasta la estratósfera donde se acumulan y

destruyen la capa de ozono provocando un gran agujero en la capa. Afortunadamente estos gases fueron prohibidos gradualmente a través del Protocolo de Montreal, el cual es un acuerdo internacional para proteger la capa de ozono, que se firmó en 1987. En virtud del acuerdo, se acordó eliminar gradualmente el uso de CFC y otros gases que destruyen la capa de ozono (BBC, 2019).

1. Refrigerantes sustitutos: Los refrigerantes hidrofluoroolefinas (HFO) se tratan de la cuarta generación de gases refrigerantes fluorados (GF). Con un potencial de agotamiento de ozono (PAO) igual a cero y bajo potencial de calentamiento global (PCG) son las soluciones de menor impacto ambiental de los gases fluorados (GASSERVEI, 2014).

Los HFO son compuestos formados por átomos de hidrógeno, flúor, y carbono. Se consideran la cuarta generación de gases refrigerantes fluorados. Poseen un potencial de agotamiento de ozono igual a cero y bajo potencial de calentamiento global (PCG) por lo que se consideran una alternativa más amigable con el medio ambiente y han ganado popularidad en la industria de la refrigeración y el aire acondicionado debido a sus propiedades ambientales. Además, también tienen un alto rendimiento y son seguros de usar (GASSERVEI, 2014).

U. Estrategias para optimizar la energía en un recinto climatizado mecánicamente

Optimizar la energía en los recintos climatizados mecánicamente es de suma importancia ya que, no solo permite tener una reducción de costos teniendo en cuenta que el acondicionamiento de espacios consume una gran cantidad de energía, lo que se traduce en costos elevados en la factura de energía eléctrica, sino también permite tener una mejora en cuanto a la eficiencia energética, es decir, la relación entre la energía utilizada y los resultados obtenidos. Al optimizar el consumo de energía en el acondicionamiento de espacios, se puede mejorar la eficiencia energética y obtener los mismos resultados con menos energía.

Según el Informe sobre la Situación Mundial de los Edificios y la Construcción realizado por el Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas el enfoque de “Mejorar” la acción de enfriar se refiere a elevar el rendimiento energético de los equipos de enfriamiento individuales, utilizando sistemas de aire acondicionado centralizados generales y aplicando estrategias de enfriamiento activo de bajo consumo de energía (UNEP, 2021).

En el caso del acondicionamiento de aire para recintos de menor tamaño, la mejora de la eficiencia energética se puede lograr principalmente mediante el dimensionamiento correcto del equipo de refrigeración y evitar tener un tamaño incorrecto en donde, si se tiene un equipo demasiado grande consumirá más energía de la necesaria y aumentará los costos operativos.

Por otro lado, si se trata de un equipo más pequeño del que se necesita, tendrá que trabajar sobre sus capacidades para mantener la temperatura deseada, lo que también aumentará el consumo de energía (UNEP, 2021).

La elección de compresores altamente eficientes es otra estrategia destacable, así como el uso de tecnología inverter y el uso de condensadores refrigerados por agua o acoplados a tierra. Para los sistemas de aire acondicionado centralizados, la consideración de estrategias de enfriamiento activo de baja energía puede mejorar aún más el rendimiento energético, como sistemas de enfriamiento radiante, enfriamiento por evaporación, ventilación por desplazamiento, ventilación con control de demanda, economizadores del lado del aire y del lado del agua, y la recuperación de entalpía (UNEP, 2021).

La digitalización en el despliegue de monitoreo y controles también puede mejorar el rendimiento energético de un sistema de enfriamiento centralizado. Los operadores pueden implementar tecnologías de última generación, como gemelos digitales, que incluyen el poder del Internet de las cosas y el análisis de datos (basado en inteligencia artificial y aprendizaje automático) para ejecutar el sistema general en su punto de eficiencia óptimo y mantener la eficiencia y salud de los equipos de refrigeración (UNEP, 2021).

V. Calidad del ambiente en interiores:

El confort implica controlar la temperatura, humedad, el movimiento de aire y de las fuentes radiantes que interactúan con los ocupantes de dicho espacio. Los olores desagradables, el polvo (partículas suspendidas), el ruido y la vibración son factores adicionales que pueden perjudicar la conformidad de los ocupantes de un recinto. Un sistema de climatización bien diseñado puede mantener estas variables dentro de los límites especificados ya sea por el cliente, por los reglamentos de construcción o por un criterio de ingeniería adecuado. También se debe tomar en cuenta factores no ambientales tales como la vestimenta y el nivel de actividad de los ocupantes (McQuiston, Parker y Spitler, 2008).

Los factores ambientales que afectan el balance térmico de una persona y que, por lo tanto, influyen en el confort térmico son: La temperatura de bulbo seco del aire circundante, la humedad del aire circundante, la velocidad relativa del aire circundante y la temperatura de toda superficie que incida directamente sobre cualquier parte del cuerpo y que de esta manera puedan intercambiar radiación. Así mismo, las variables personales que influyen en el confort térmico son: la actividad física y la vestimenta (McQuiston, Parker y Spitler, 2008).

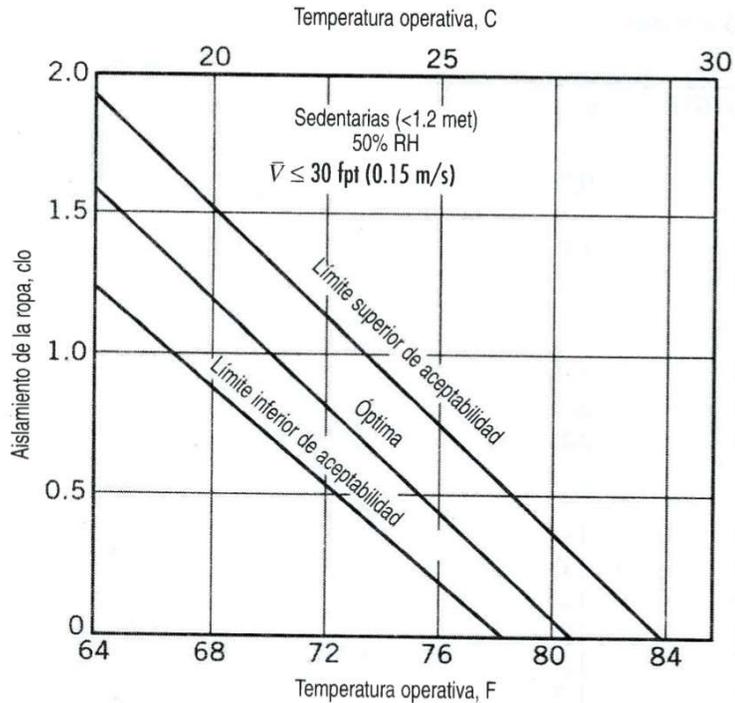


Figura 12. Aislamiento térmico de la ropa para varios niveles de confort

W. Síndrome del edificio enfermo

El síndrome del edificio enfermo (SBS) es un término que se emplea para describir una situación en la que los ocupantes de un edificio experimentan enfermedades graves relacionados con la salud o la comodidad que parecen estar relacionados directamente con el tiempo que pasan en el edificio. No se puede identificar ninguna enfermedad o causa específica. Las personas que presentan síntomas pueden estar localizadas en una habitación o zona en particular o pueden estar esparcidos por todo el edificio (Joshi, 2008).

X. Principales factores responsables del Síndrome del edificio enfermo

1. **Contaminantes químicos de fuentes exteriores:** Los contaminantes del exterior, como los contaminantes del escape de los vehículos motorizados, las rejillas de ventilación de las cañerías y los escapes de los edificios (baños y cocinas) pueden ingresar al edificio a través de las rejillas de ventilación, las ventanas y otras aberturas mal ubicadas. El radón, el formaldehído, el asbesto, el polvo y la pintura con plomo pueden ingresar a través de las ventilaciones de entrada de aire mal ubicadas y otras aberturas (Joshi, 2008).
2. **Contaminantes químicos de fuentes interiores:** El contaminante más común del aire interior incluye los compuestos orgánicos volátiles (COV). Las principales fuentes de VOC son los adhesivos, la tapicería, las alfombras, las fotocopiadoras, los productos de madera manufacturados, los pesticidas, los agentes de limpieza, etc (Joshi, 2008).

El humo ambiental del tabaco, las partículas respirables, los subproductos de la combustión de estufas, chimeneas y calefactores sin ventilación también aumentan la contaminación química (Joshi, 2008).

3. **Contaminantes biológicos:** Los contaminantes biológicos incluyen polen, bacterias, virus, hongos, moho, etc. Estos contaminantes pueden reproducirse en agua estancada que se ha acumulado en humidificadores, tuberías de desagüe y conductos o donde el agua se ha acumulado en tejas, aislamiento, alfombras y tapicería (Joshi, 2008).
4. **Ventilación inadecuada:** Los sistemas defectuosos de calefacción, ventilación y aire acondicionado (sistemas HVAC) también aumentan la contaminación del aire interior. Para tener una calidad de aire interior aceptable, con un consumo de energía mínimo, la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASH-RAE) revisó recientemente los estándares de ventilación a una tasa mínima de flujo de aire exterior de 15 cfm/persona para evitar los problemas relacionados con una ventilación inadecuada. Los estándares son 20 cfm/persona en espacios de oficina y 60 cfm/persona en salones para fumadores (Joshi, 2008).

Y. Purificadores de aire

Los purificadores de aire basan su funcionamiento en la extracción del aire de la estancia a través de un ventilador y lo depuran por medio de un sistema de filtros que retienen las partículas que estaban en suspensión. Al atravesar el aparato, el aire es filtrado en fases distintas y sucesivas, quedando atrapadas las sustancias contaminantes en los diferentes tipos de filtros según su tamaño y capacidad de filtración. Después de filtrado, el aire es devuelto al ambiente, ya purificado. Algunos aparatos cuentan con un sensor de calidad del aire que actúa de forma permanente y al detectar un incremento en la contaminación ambiental, aumenta la potencia de ventilación (Arnabat, 2021).

Estos filtros purificadores de aire pueden utilizarse en conjunto con las bombas de calor ya que, si se está utilizando una bomba de calor con un sistema de conductos de aire, puede instalarse un filtro purificador de aire en el conducto de retorno, que es el conducto que lleva el aire de vuelta a la unidad de la bomba de calor para su recirculación. Esto asegurará que el aire que se está recirculando a través del sistema de conductos esté limpio y libre de contaminantes.

Z. Termodinámica

El término termodinámica proviene de las palabras griegas *therme* (calor) y *dynamis* (fuerza), lo cual corresponde a lo más descriptivo de los primeros esfuerzos por convertir el calor en energía. En la actualidad, el concepto se interpreta de manera amplia para incluir los aspectos de energía y sus transformaciones, incluida la generación de potencia, la refrigeración y las relaciones entre las propiedades de la materia (McQuiston, Parker, Spitler, 2008).

1. **Calor sensible y su almacenamiento en edificaciones.** La energía térmica se almacena elevando la temperatura de un sólido o líquido. El sistema de almacenamiento de calor sensible utiliza la capacidad calorífica y el cambio de temperatura del material durante el proceso de carga y descarga. La cantidad de calor almacenado depende del calor específico del medio, el cambio de temperatura y la cantidad de material de almacenamiento (Sharma et al., 2009).
2. **Calor latente y su almacenamiento en edificaciones.** El almacenamiento de calor latente se basa en el calor absorbido o liberado cuando un material sufre un cambio de fase de un estado físico a otro. El cambio de fase puede ocurrir en las siguientes formas: sólido-sólido, sólido-líquido, sólido-gas, líquido-gas y viceversa. Los materiales utilizados en este tipo de almacenamiento se denominan materiales de cambio de fase (Tatsidjodoung et al., 2013).
3. **Carga térmica.** Se entiende por carga térmica la energía necesaria requerida para mantener o alcanzar ciertas condiciones de temperatura y humedad en un área específica, dependiendo de su uso, ya sea para fines residenciales o para una actividad en particular. En otras palabras, se trata de la cantidad de calor que se tiene que remover en un espacio para mantener cierta temperatura confortable y saludable. La carga térmica depende de diversos factores como el tamaño del recinto, la cantidad de personas que lo habitan, la cantidad de equipos electrónicos y de iluminación, la orientación del edificio, el clima en el área y la ubicación geográfica. El cálculo de la carga térmica es muy importante ya que ayuda a determinar el tamaño correcto del sistema de climatización que se necesita para mantener un ambiente agradable y cómodo (SP, 2020).

VI. METODOLOGÍA

Antes de diseñar, dimensionar o escoger un sistema de climatización es importante conocer el máximo probable de pérdida de calor que se tendrá en cada recinto o espacio acondicionado. Estas pérdidas de calor pueden ser a través de dos tipos, el primero es el calor transmitido a través de paredes, techos, pisos, ventanas y demás superficies, el segundo se trata del calor que se requiere para calentar el aire del exterior que entra en el recinto. La carga térmica es la suma de estas pérdidas de calor (McQuiston, Parker y Spitler, 2007).

El cálculo de la carga térmica de un recinto es de suma importancia ya que, gracias a ello se puede determinar la cantidad de energía que se requiere para mantener la temperatura y el confort del espacio acondicionado, así como el tamaño y capacidad de los equipos a considerar para la climatización. En pocas palabras, calcular la carga térmica del recinto permite escoger el tamaño correcto del equipo de climatización, de igual manera se podrá garantizar un uso eficiente de la energía y una temperatura confortable en el recinto.

A. Análisis de cargas térmicas del apartamento analizado

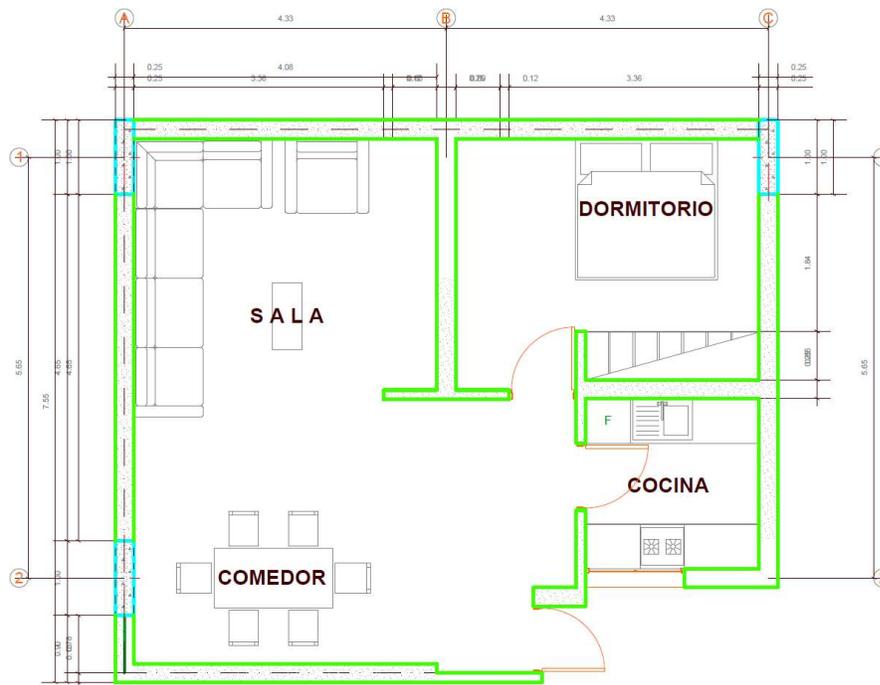


Figura 13. Planta del apartamento dimensionado

B. Datos del espacio a climatizar

Alto	8.37	ft	2.55	m
Largo	25.10	ft	7.65	m
Ancho	11.02	ft	3.36	m
Área total	276.68	ft ²	25.70	m ²
Volumen	2314.71	ft ³	65.55	m ³

Cuadro 6

Dimensiones de la habitación considerada: Sala – comedor

	Material	Espesor (ft)	Alto (ft)	Largo (ft)	Área (ft ²)	Área neta (ft ²)
Pared Este	Block	0.49	8.37	11.48	96.07	96.07
Pared Oeste	Block	0.49	8.37	24.77	207.23	139.42
Pared Sur	Block	0.49	8.37	11.02	92.23	71.09
Pared Norte	Block	0.49	8.37	11.02	92.23	92.23

Cuadro 7

Especificaciones de las paredes

	Alto (ft)	Largo (ft)	Área (ft²)
Ventana comedor	6.89	4.92	33.91
Ventana sala	6.89	4.92	33.91
Puerta	6.89	3.07	21.13

Cuadro 8
Especificaciones de aberturas

Coldest month	Heating DB		Humidification DP/MCDB and HR					
	99.6%	99%	99.6%			99%		
			DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB
1	51.6	53.5	42.4	48	62.1	44.5	52.1	62.8

Coldest month WS/MCDB				MCWS/PCWD to 99.6% DB	
0.4%		1%		MCWS	PCWD
WS	MCDB	WS	MCDB		
31.8	64.8	28.8	63.5	13.1	0

Cuadro 9
Condiciones anuales de diseño de calefacción y humidificación

Tdb	82.5 °F
Twb	64.2 °F

Cuadro 10
Temperaturas externas

Tdb	77 °F
Twb	63 °F

Cuadro 11
Temperaturas internas

	Material	Espesor (ft)	U (BTU/h ft² F)	Área (ft²)	ΔT (F)	Q (BTU/h)
Pared Este	Block	0.67	0.56	96.07	5.50	295.89
Pared Oeste	Block	0.67	0.56	139.42	5.50	429.41
Pared Sur	Block	0.67	0.56	71.09	5.50	218.96
*Asumiendo bloques huecos de hormigón de 8 in de espesor con agregado de grava					Total	944.26
*Las paredes Este y Oeste consideran la ventana y puerta respectivamente						

Cuadro 12
Cálculo de conducción térmica en las paredes que no les pega el sol

Orientación de la pared	Hora	Área (ft ²)	U (BTU / h ft ² F)	ΔT (F)	Δ Temperatura corregido (F)	Q (BTU/h)
Norte	8:00 a. m.	92.23	0.56	-2.00	-11.50	-593.93
Norte	10:00 a. m.	92.23	0.56	-2.00	-11.50	-593.93
Norte	12:00 p. m.	92.23	0.56	-2.00	-11.50	-593.93
Norte	2:00 p. m.	92.23	0.56	0.00	-9.50	-490.64
Norte	4:00 p. m.	92.23	0.56	6.00	-3.50	-180.76
Norte	6:00 p. m.	92.23	0.56	10.00	0.50	25.82
Norte	8:00 p. m.	92.23	0.56	10.00	0.50	25.82
Norte	12:00 a. m.	92.23	0.56	6.00	-3.50	-180.76

Cuadro 13

Cálculo de conducción térmica en la pared que le pega el sol (Pared Norte)

	U (BTU / h ft ² F)	Área (ft ²)	ΔT (F)	Q (BTU/h)
Puerta sólida de madera de 1 1/2" de espesor	0.49	21.13	5.50	56.96

Cuadro 14

Cálculo de conducción térmica en la puerta

Actividad	Cantidad	Qs (BTU/h)	QI (BTU/h)
Trabajo moderadamente activo	4.00	800.00	1000.00

Cuadro 15

Calor debido a los ocupantes

Equipo	Número	Potencia (W)	Qs (BTU/h)	Q (BTU/h)
Luminarias	5	15.00	3413.00	255.98
Televisor	1	150.00	511.95	76.79

Cuadro 16

Ganancia de calor debido a los equipos

	U (BTU / h ft ² F)	Área (ft ²)	Δ Temperatura (F)	Q (BTU/h)
Techo de hormigón con aislamiento de 1/2"	0.64	276.68	32.00	5666.32

Cuadro 17

Cálculo de conducción térmica en el techo

	U (BTU / h ft ² F)	Área (ft ²)	Δ Temperatura (F)	Q (BTU/h)
Piso tipo B con 6 in de espesor	0.41	276.68	5.50	623.90

Cuadro 18

Cálculo de conducción térmica en el piso

Tipo de abertura	Observaciones	Aire infiltrado (ft ³ /h)
Ventana metálica en bastidor simple	Ventana residencial	52
Puerta	Bien ajustada	54
	Total	106

Cuadro 19

Infiltración por hendiduras a través de ventanas y puertas

Inputs			Outputs		
Unit Chosen:	<input type="radio"/> SI	<input checked="" type="radio"/> IP	Atmospheric Press	29.921	In.Hg
Parameter Name	Value	Unit	Sat. Vapor Press.	1.12050609	In.Hg
Dry Bulb Temp.:	82.5	F	Partial Vapor Press.	0.40277819	In.Hg
Wet Bulb Temp.:	64	F	Humidity Ratio	0.00848723	lb/lb
Relat. Humidity:	35.9460958	%	Enthalpy	29.1158419	Btu/lb
Dew Point Temp	52.9021627	F	Specific Volume	13.8494530	Ft ³ /lb
Altitude	0	Ft			
Calculate			©		

Cuadro 20

Condiciones externas

Inputs			Outputs		
Unit Chosen:	<input type="radio"/> SI	<input checked="" type="radio"/> IP	Atmospheric Press	29.921	In.Hg
Parameter Name	Value	Unit	Sat. Vapor Press.	0.93586909	In.Hg
Dry Bulb Temp.:	77	F	Partial Vapor Press.	0.43024866	In.Hg
Wet Bulb Temp.:	63	F	Humidity Ratio	0.00907452	lb/lb
Relat. Humidity:	45.9731667	%	Enthalpy	28.4183148	Btu/lb
Dew Point Temp	54.7030973	F	Specific Volume	13.7217186	Ft ³ /lb
Altitude	0	Ft			
Calculate			©		

Cuadro 21

Condiciones internas

Wso (gr/lbm)	59.41
Wsi (gr/lbm)	63.52
ρ exterior (lb/ft ³)	0.07

Qs (Btu/h)	10.27
Gramos de humedad (lb/h)	-31.46
Ql (Btu/h)	-4.72

Cuadro 22

Cálculo de la humedad específica y densidad del aire

Elemento	Carga (Btu/h)
Muros que les pega el sol y ventana	39.82
Muros que no les pega el sol	944.26
Puertas	56.96
Personas latente	1000.00
Personas sensible	800.00
Equipo	255.98
Losa	623.90
Techo	5666.32
Infiltración	10.27
Infiltración latente	-4.72
Carga total	9392.79

Cuadro 23
Carga térmica total

C. Selección de equipos

- 1. Tonelada de refrigeración.** Una de las formas de clasificar los aires acondicionados es mediante la unidad nominal de potencia térmica de tonelada de refrigeración, la cual es utilizada para medir la capacidad de un sistema de refrigeración para extraer calor de un espacio, es decir, para expresar la capacidad de enfriamiento de un sistema de aire acondicionado o un refrigerador. Equivale a la cantidad de calor necesaria para derretir una tonelada de hielo en 24 horas. Una tonelada de refrigeración equivale a aproximadamente 12.000 BTU (British Thermal Units) por hora.

$$(1 \text{ Ton. De Refrigeración})(9392.79 \text{ BTU/HR}) / (12000 \text{ BTU/HR}) = 0.78 \text{ TR}$$

Dado que la disponibilidad en el mercado es de 1.5 TR o 2TR se seleccionará la más cercana, es decir, un dispositivo de 1.5 TR.

El sistema de climatización elegido para el aire acondicionado tradicional, en este caso, un equipo de aire acondicionado tipo Split modelo AC122CE de 11,600 BTU fabricado por la marca Hisense. La elección se basó principalmente en el factor económico, con el propósito de emular el comportamiento del comprador promedio, quien a menudo toma decisiones basadas en el costo inicial sin tomar en consideración otros factores adicionales y mucho menos medio ambientales. No obstante, es relevante destacar que se aseguró que dicho equipo tuviera la capacidad adecuada para satisfacer la carga térmica requerida por el espacio en cuestión.

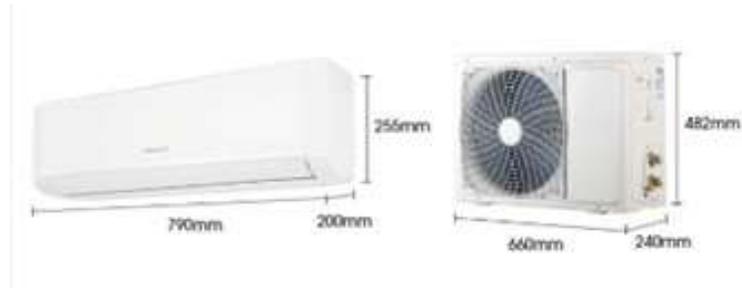


Figura 14. Equipo de aire acondicionado modelo AC122CE de la marca Hisense

Para llevar a cabo la selección del equipo de bomba de calor, se optó por un proceso formal y riguroso, involucrando a proveedores debidamente autorizados que ofrecen sistemas de aire acondicionado y bombas de calor en el país. En este contexto, se estableció contacto con la empresa CAELSA, reconocida como distribuidores autorizados de productos de la marca Carrier, una de las empresas líderes en sistemas de climatización a nivel mundial. Para respaldar la toma de decisiones, se proporcionó a dichos proveedores un plano que detallaba las dimensiones del espacio a ser climatizado, junto con las especificaciones que requerían que el equipo no solo satisficiera la carga térmica necesaria para el recinto, sino que además demostrara una destacada eficiencia energética. La propuesta presentada por CAELSA correspondió a un sistema de bomba de calor Mini Split Xpower Inverter de la marca Carrier, que se consideró como una opción adecuada para cumplir con los requisitos establecidos.



Figura 15. Equipo de bomba de calor modelo Mini Split Xpower Inverter de la marca Carrier

Factor	Aire Acondicionado AC122CE - Hisense	Bomba de Calor Mini Split Xpower - Carrier
Tipo	Cooling Only	Aire -Aire
Capacidad	11,600 BTU/HR	24,000 BTU/HR
Fuente de energía	Electricidad	Electricidad y Aire
Dimensiones Unidad Exterior (mm)	660 × 482 × 240	720 x 270 x 495
Dimensiones Unidad Interior (mm)	790 × 255 × 200	802 x 200 x 295
Tipo de Refrigerante	R410a	R410a
Potencia	1108 W	970 W
Eficiencia Energética (SEER)	2.91 BTU/HR/W	25 BTU/HR/W

Cuadro 24

Resumen de las características de los equipos seleccionados

El aire acondicionado tradicional, representado por el modelo AC122CE de la marca Hisense, se caracteriza por ser de tipo Cooling Only, lo que significa que su función principal es proporcionar enfriamiento al espacio que se desea aclimatar. Esta limitación constituye una desventaja evidente, especialmente en estaciones frías, ya que no puede suministrar calefacción. Para suplir esta carencia, es necesario recurrir a sistemas adicionales, como radiadores o calentadores de gas, lo que puede resultar en una solución menos eficiente y costosa.

Por otro lado, la bomba de calor Mini Split Xpower de Carrier opera bajo el principio de un sistema aire-aire, lo que implica que aprovecha la energía presente en el aire exterior tanto para calentar como enfriar el aire interior de un recinto. El funcionamiento de una bomba de calor aire-aire se basa en el ciclo termodinámico de refrigeración, que es similar al empleado por los aires acondicionados convencionales. En el modo de calefacción, este ciclo se invierte, lo que implica que el refrigerante se evapora en el exterior, absorbiendo calor del aire circundante. Posteriormente, el refrigerante evaporado se comprime y condensa en el interior del sistema, liberando calor hacia el aire interior.

Una ventaja significativa de las bombas de calor aire-aire radica en su eficiencia energética, especialmente en climas moderados, donde pueden superar en un 50 % a los sistemas de aire acondicionado tradicionales. Este rendimiento mejorado resulta en un menor consumo de energía y, por lo tanto, en costos operativos reducidos, lo que hace que las bombas de calor sean una opción atractiva desde el punto de vista económico y medioambiental.

- 2. Refrigerante R410A.** Un aspecto relevante de ambos sistemas es su empleo del refrigerante R410A. Este refrigerante se caracteriza por su elevado nivel de seguridad, lo cual lo coloca en la categoría A1/A1 según la clasificación de la ASHRAE (Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado), lo que significa que no es tóxico ni inflamable, incluso en situaciones de fugas potenciales. A diferencia de los refrigerantes que contienen cloro y bromo, conocidos como haloalcanos, el R-410A se compone únicamente de flúor, lo que garantiza que no tenga un impacto negativo en la destrucción de la capa de ozono. Por esta razón, se ha convertido en una elección ampliamente aceptada, especialmente a medida que los refrigerantes como el R22 fueron retirados del mercado debido a sus efectos perjudiciales.

No obstante, es importante destacar que el R410A presenta un alto Índice de Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés), que es 1725 veces mayor que el del dióxido de carbono (CO₂). Esta característica, en términos simples, implica que el R410A tiene un impacto significativo en el cambio climático, similar al del gas R22. Por lo tanto, a pesar de sus propiedades de seguridad y eficacia, existe una creciente preocupación por su contribución al calentamiento global, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas más ecológicas y de menor GWP en el campo de la refrigeración.

- 3. Coeficiente SEER .** Para medir qué tan eficientes son estos sistemas se cuenta con el coeficiente SEER el cual es significa Seasonal Energy Efficiency Ratio o Relación de Eficiencia Energética Estacional, una métrica utilizada para medir la eficiencia energética de los sistemas de aire acondicionado y bombas de calor en climatización. El SEER es particularmente relevante en el contexto de equipos de climatización residencial.

El SEER se calcula tomando en cuenta el rendimiento del sistema a lo largo de una temporada completa de funcionamiento, lo que incluye una variedad de condiciones climáticas y cargas térmicas típicas. El objetivo es proporcionar una medida más precisa de la eficiencia energética en comparación con el EER (Energy Efficiency Ratio), que evalúa la eficiencia solo en condiciones específicas de laboratorio. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{SEER} = \text{Capacidad Total de Enfriamiento (BTU)} / \text{Consumo Total de Energía (W)}$$

La eficiencia energética de un sistema de climatización se correlaciona directamente con el valor del coeficiente SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio). En otras palabras, cuanto mayor sea el SEER, mayor será la eficiencia del sistema en términos de consumo de energía eléctrica para proporcionar una cierta cantidad de enfriamiento. Los sistemas con un SEER más elevado se consideran altamente eficientes, lo que implica que consumen menos energía eléctrica para lograr el mismo nivel de enfriamiento en comparación con sistemas menos eficientes.

Para el caso de estudio, es relevante señalar que el aire acondicionado convencional cuenta con un índice de Eficiencia Energética Estacional (SEER) de 2.91 Btu/hr/W lo cual se considera muy bajo y significa que el consumo de energía eléctrica del equipo es alto. Por otro lado, la bomba de calor cuenta con un índice SEER de 25 Btu/hr/W lo cual se clasifica como muy alto e indica que el consumo de este equipo en términos de energía es muy bajo. Esta diferencia sustancial en el valor del SEER señala claramente la ventaja de la bomba de calor en términos de eficiencia energética. Como resultado, la bomba de calor tiene el potencial de generar ahorros notables en los costos de energía, lo que la convierte en una opción muy atractiva desde el punto de vista económico y medioambiental.

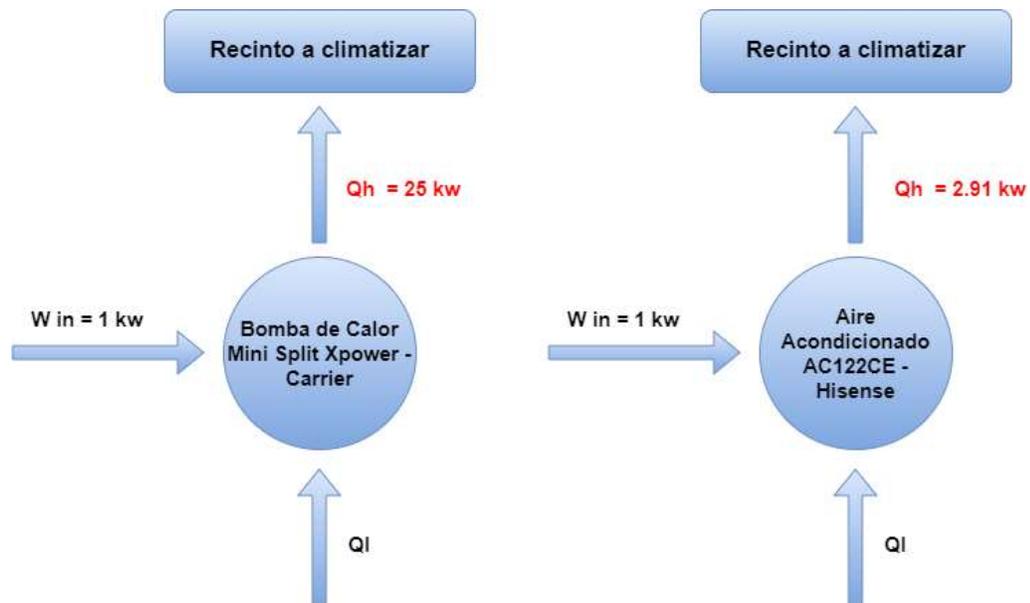


Figura 16. Eficiencia en la conversión de energía por kilovatio entre los dos equipos

D. Estimación de emisiones de GEI

El proceso de determinar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) vinculadas a un sistema de aire acondicionado o una bomba de calor requiere considerar diversos factores, como la eficiencia energética del sistema, el refrigerante empleado y la fuente de energía que alimenta su funcionamiento. Uno de los factores más importantes en el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero es conocer la cantidad de dichas emisiones ya asociadas con la generación de electricidad en Guatemala ya que ambos sistemas emplean electricidad para su funcionamiento.

Para ello se hace referencia al Balance Energético proporcionado por el Ministerio de Energía y Minas de Guatemala para el año 2022. El balance energético desempeña un papel esencial en la medición, comprensión y evaluación del flujo de energía del país. Facilita la evaluación de todas las etapas y operaciones involucradas en la cadena de suministro de energía, que abarca desde la generación hasta el consumo, y permite un análisis de sus interconexiones y equilibrio entre la generación y el consumo. De igual manera, proporciona datos sobre la generación, conversión y utilización de recursos energéticos en los diversos bloques de consumo.

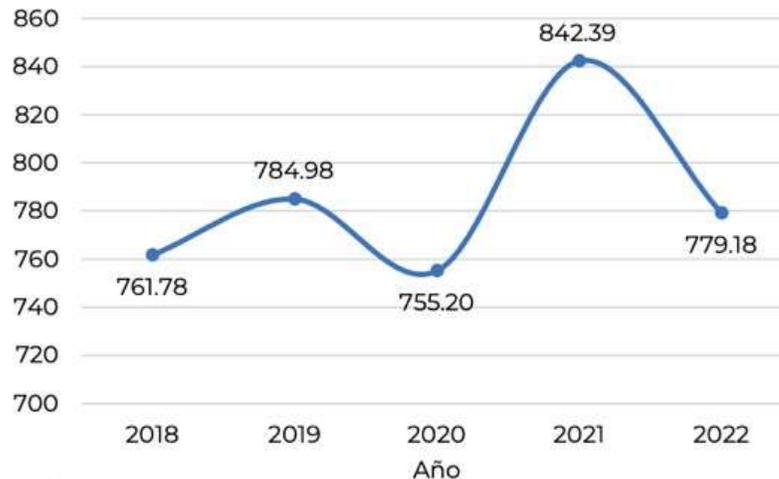


Figura 17. Consumo de energía eléctrica en kWh/habitante

Es importante mencionar que en el sector energético se contabilizan tres tipos de Gases de Efecto Invernadero, los cuales son: dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄). Sin embargo, para la homogeneidad en la información de la cantidad de GEI emitidos por el sector, el informe indica que estos se convierten a una misma unidad dimensional, la cual es el dióxido de carbono equivalente (CO₂e).

Para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el sector de la energía, se emplea la cantidad de combustible consumido como un indicador de actividad (conocido como Dato de Actividad o DA) y la cantidad de carbono liberado por unidad de combustible quemado (denominado Factor de Emisión o Fe). La fórmula básica para este cálculo es:

$$\text{Emisiones de GEI} = \text{DA} \times \text{Fe}$$

Los Factores de Emisión se determinan para cada tipo de combustible utilizado en el cálculo y se basan en directrices metodológicas establecidas por el IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). Estos factores representan la cantidad de GEI liberada por unidad de energía producida a partir de un combustible específico.

Los coeficientes de emisión en el sector eléctrico de Guatemala son medidas de eficiencia que cuantifican la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) liberadas como resultado de la generación o consumo de energía eléctrica. Estos coeficientes se expresan en la siguiente unidad dimensional:

$$\text{Coeficientes de emisión} = [\text{kg de CO}_2\text{e por kilovatio-hora (kg CO}_2\text{e/KWh)}].$$

La determinación de los coeficientes de emisión implica calcular las emisiones totales de GEI asociadas con cada tipo de combustible, medidas en CO₂ equivalente (CO₂e), y relacionarlas con la cantidad total de energía eléctrica generada a partir de esos combustibles.

Generación por tipo de combustible 2022	Factor de Emisión (kg CO₂ e / kWh)
Carbón Mineral	0.6351
Fuel Oil	0.6368
Bagazo de Caña	0.0576
Biogás	0.0011
Diésel Oil	0.6636
Leña	0.2285
Fuentes renovables	0.0000

Cuadro 25
Factor de emisión para cada tipo de combustible

Así mismo, es importante considerar que el Informe de Balance Energético 2022 muestra que, para la generación de energía eléctrica se emplean principalmente los combustibles de gas natural, biogas, diesel oil, bagazo de caña, fuel oil y, en gran medida, el carbón mineral. A continuación, se presenta un gráfico con las emisiones de GEI por combustible como fuente para la generación de energía eléctrica en Guatemala.

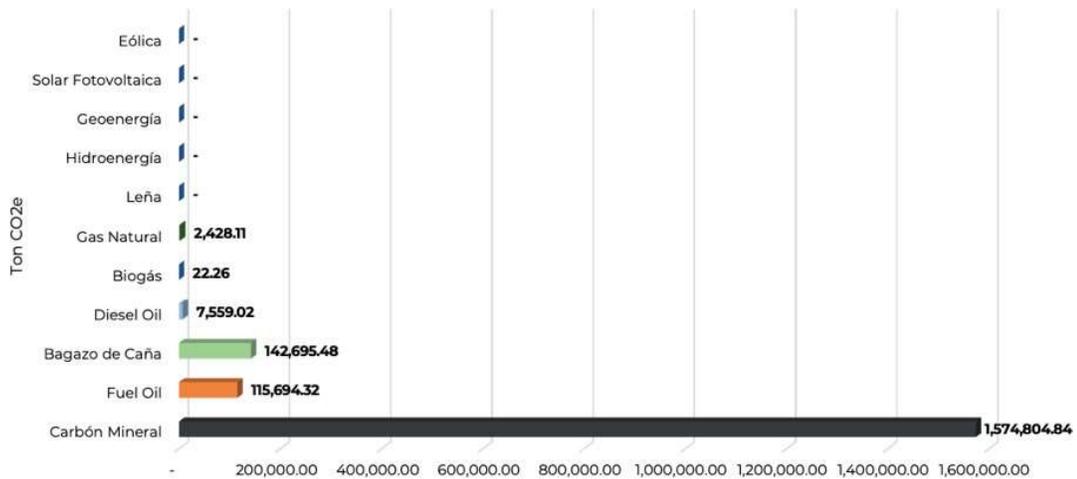


Figura 18. Emisiones de GEI asociados a la generación de energía eléctrica en Guatemala 2022 (Ton CO₂ e)

E. Consumo de electricidad del equipo de aire acondicionado AC122CE – Hisense:

$$\text{Consumo eléctrico (kWh)} = (\text{Potencia(W)} \times \text{Usos(h)} \times \text{Días})/1000 \text{ W}$$

$$\text{Consumo eléctrico (kWh)} = (1,108 \text{ W} \times 8 \text{ h} \times 365 \text{ días})/1000 \text{ W}$$

$$\text{Consumo eléctrico (kWh)} = 3,235.36 \text{ kWh al año}$$

$$\text{Consumo eléctrico real (kWh)} = (\text{Consumo eléctrico (kWh)})/\text{SEER}$$

$$\text{Consumo eléctrico real (kWh)} = 3,235.36 \text{ kWh}/2.91$$

$$\text{Consumo eléctrico real (kWh)} = 1,111.81 \text{ kWh al año}$$

F. Emisiones de GEI del equipo de aire acondicionado AC122CE – Hisense:

$$\text{Emisiones GEI} = 1,111.81 \text{ kWh} \times 1.9942 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh}$$

$$\text{Emisiones GEI} = 2,217.17 \text{ KgCO}_2\text{e}$$

G. Consumo de electricidad del equipo de bomba de calor Mini Split Xpower – Carrier:

$$\text{Consumo eléctrico (kWh)} = (\text{Potencia(W)} \times \text{Usos(h)} \times \text{Días})/1000$$

$$\text{Consumo eléctrico (kWh)} = (970 \text{ W} \times 8 \text{ h} \times 365 \text{ días})/1000$$

$$\text{Consumo eléctrico (kWh)} = 2,832.4 \text{ kWh al año}$$

$$\text{Consumo eléctrico real (kWh)} = (\text{Consumo eléctrico (kWh)})/\text{SEER}$$

$$\text{Consumo eléctrico real (kWh)} = 2,832.4 \text{ kWh}/25$$

$$\text{Consumo eléctrico real (kWh)} = 113.296 \text{ kWh al año}$$

H. Emisiones de GEI del equipo de bomba de calor Mini Split Xpower – Carrier

$$\text{Emisiones GEI} = 113.296 \text{ kWh} \times 1.9942 \text{ KgCO}_2\text{e/KWh}$$

$$\text{Emisiones GEI} = 225.93 \text{ Kg CO}_2\text{e}$$

I. Análisis costo - beneficio

Un análisis de costo-beneficio es una herramienta esencial en la evaluación de la factibilidad económica de un proyecto o inversión. Este proceso implica cuantificar y comparar los costos y los beneficios obtenidos en términos monetarios, con el propósito de determinar la rentabilidad potencial del proyecto.

1. Objetivo del análisis: Llevar a cabo una evaluación minuciosa de los desembolsos asociados con la adquisición, operación, mantenimiento y demás costos involucrados en la vida útil tanto los sistemas de bomba de calor aire-aire como de los sistemas de aire acondicionado convencionales. De igual manera se busca analizar detenidamente los retornos y ventajas inherentes a ambas alternativas. Este análisis integral engloba la medición del rendimiento de los sistemas y la evaluación de su viabilidad en términos generales.

2. Resumen de los costos asociados a ambas unidades de climatización:

- 1) Considerando Q 1.36/kWh para la Tarifa No Social según datos de EEGSA, así como un uso de 8 horas diarias al año para ambos equipos para el cálculo del consumo de energía eléctrica.

Equipo	Consumo al año (kWh)	Costo de la energía eléctrica (Q/kWh)	Costo de operación al año (Q)
Aire Acondicionado	1,111.81	1.36	1,512.06
Bomba de Calor	113.29	1.36	154.08
Diferencia	998.52	-	1,357.98

Cuadro 26
Costo de operación para cada equipo

Costos	Aire Acondicionado AT122CB – Hisense	Bomba de Calor Mini Split Xpower - Carrier
Costo del equipo (Q)	3,999.00	9,128.71
Costo de Instalación (Q)	2,500.00	3,500.00
Costo de mantenimiento (Q)	2,400.00	1,180.38
Costo del consumo de energía eléctrica (Q)	1,512.06	154.08

Cuadro 27
Recopilación de los costos involucradas en ambos equipos

3. Beneficios más importantes de las bombas de calor.

- 1) Poseen una eficiencia energética mayor en comparación de un aire acondicionado convencional lo cual se mide a través del SEER. Esto se traduce en menores costos de operación y un menor consumo eléctrico en comparación con los sistemas de aire acondicionado convencionales que solo proporcionan refrigeración. El SEER toma en cuenta las variaciones estacionales en la demanda de calefacción y refrigeración. Esto es importante porque en climas donde las temperaturas varían ampliamente durante el año, como en regiones con inviernos fríos y veranos calurosos, una bomba de calor eficiente puede aprovechar la energía térmica del aire exterior para calentar la casa en invierno y enfriarla en verano, lo que reduce aún más los costos operativos.

- 2) Las bombas de calor son capaces de brindar tanto refrigeración como calefacción en un solo equipo, mientras que el aire acondicionado solo permite enfriar el espacio. Es decir, en invierno, pueden extraer calor del aire exterior frío y transferirlo al interior de la vivienda para proporcionar calefacción. En verano, realizan lo contrario, extrayendo el calor del interior y expulsándolo al exterior para enfriar el espacio. Esto significa que no es necesario invertir en dos sistemas separados (un aire acondicionado y un sistema de calefacción), lo que ahorra costos tanto en la compra como en la instalación.
- 3) Contar con un solo equipo permite ahorrar en espacio en donde, al utilizar una bomba de calor, se ahorra espacio en el hogar o lugar de trabajo, ya que solo se necesita un equipo en lugar de dos. Esto es especialmente valioso en viviendas con espacio limitado o en edificios comerciales donde el espacio es un recurso importante.
- 4) Las bombas de calor requieren un mantenimiento menor al de los aires acondicionados tradicionales, esto se debe a que, en la mayoría de ocasiones, las bombas de calor tienen menos componentes en movimiento, lo que reduce la probabilidad de desgaste y averías, es decir, son sistemas más simples.

J. Análisis económico

Con el objetivo de llevar a cabo un análisis económico completo y efectivo con respecto a la viabilidad de la implementación de bombas de calor como un sistema sostenible de climatización, en contraposición al uso de sistemas de aire acondicionado convencionales, se inició un proceso de evaluación que abarca varios indicadores económicos clave. Entre estos indicadores sobresalen el Valor Presente Neto (VPN), la Relación Costo-Beneficio (RCB) y el Retorno sobre la Inversión (ROI), los cuales se presentan a continuación. Este enfoque analítico se fundamenta en la necesidad de evaluar de manera integral las implicaciones económicas de la adopción de tecnologías más sostenibles en el ámbito de la climatización, tomando en consideración no solo los aspectos financieros a corto plazo, sino también los beneficios a largo plazo y la sostenibilidad medioambiental que conllevan dichas decisiones.

1. **Valor Presente Neto (VPN):** El Valor Presente Neto (VPN) es una métrica financiera utilizada en el ámbito de la inversión y la toma de decisiones empresariales para evaluar la rentabilidad de un proyecto o una inversión. También es conocido como Valor Actual Neto del cual se obtiene el valor presente, es decir, lo que se puede recibir en la actualidad a partir de una inversión, según los flujos de efectivo o valores futuros de la misma, para un lapso determinado.

El Valor Presente Neto es ampliamente empleado en el ámbito financiero, especialmente en la gestión de proyectos y las inversiones, ya que proporciona una evaluación precisa de la rentabilidad de una inversión u operación. Esta métrica permite calcular con precisión las ganancias anticipadas a partir de la ejecución de la inversión. Permite la capacidad de tomar decisiones de forma segura al momento de invertir. Al llevar a cabo este tipo de análisis, se pueden aprovechar oportunidades en el momento adecuado, minimizando pérdidas y asegurando un resultado beneficioso.

A continuación se presenta la fórmula para el cálculo del valor presente neto:

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - CF_0$$

- C_f_0 = Inversión inicial
- C_f_t = Flujo de efectivo en el periodo t
- t = Periodo
- k = Tasa de interés o costo de oportunidad

2. **Relación costo-beneficio (BCR):** Se trata de una medida que refleja la relación global entre los desembolsos y las ventajas financieras en un periodo específico. En esencia, se trata del beneficio propuesto total en efectivo dividido por los costos totales propuestos en efectivo. Sin embargo, para realizar este cálculo de manera más dinámica, es necesario calcular el valor presente neto de los costos y beneficios a lo largo del ciclo de vida planificado del proyecto. Cuando el BCR es mayor a uno, esto indica que los beneficios superan los costos.

$$B/C = \frac{\text{Beneficios de la inversión}}{\text{Costos totales de la inversión}}$$

3. **Retorno sobre la inversión (ROI):** Se trata de una métrica financiera utilizada en economía para evaluar la rentabilidad de una inversión o proyecto. El ROI se expresa generalmente como un porcentaje y se utiliza para medir cuánto beneficio o ganancia se obtiene en relación con el costo de la inversión inicial. Esta métrica es esencial para tomar decisiones informadas sobre la asignación de recursos financieros y para evaluar la eficacia de diferentes inversiones.

$$\%ROI = \frac{\text{Ganancia} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}} \times 100$$

4. **Periodo de recuperación:** Se conoce como periodo de recuperación de la inversión, PRI o Payback, al lapso requerido para que el capital invertido en un proyecto sea recuperado en su totalidad. Este concepto también puede ser definido como el tiempo que un proyecto necesita para generar un retorno monetario que compense la inversión inicial.

$$\text{Periodo de recuperación} = a + \frac{b - c}{d}$$

a = Año anterior inmediato a que se recupere la inversión

b = Inversión inicial

c = Flujo de efectivo acumulado del año inmediato anterior en el que se recupera la inversión

d = Flujo de efectivo del año en el que se recupera la inversión

K. Recopilación de los resultados del análisis económico:

- Inversión inicial = Q9,128.71
- Ahorro anual = Q1,357.98
- Valor de salvamento = Q200.00
- TMAR = 10 %
- Periodo de recuperación = $a + ((b - c) / d)$ Donde:
- a = Año anterior inmediato a que se recupere la inversión
- b = Inversión inicial
- c = Flujo de efectivo acumulado del año inmediato anterior en el que se recupera la inversión
- d = Flujo de efectivo del año en el que se recupera la inversión
- Periodo de recuperación = $7 + ((Q9,128.71 - Q8,147.88) / Q1,357.98)$
- Periodo de recuperación = 7.72
- Desglose:
- Años = 7
- Meses = $(12 \text{ meses} / 1 \text{ año}) * (0.72) = 8.64 = 8$
- Días = $(30 \text{ días} / 1 \text{ Mes}) * (0.64) = 19$
- Período de recuperación = 7 años, 8 meses y 19 días
- VPN = Q1,248.07
- B/C = 2.25
- %ROI = 125 %

Factor	Año								
	0	1	2	3	4	5	6	7	
Inversión inicial	-Q 9,128.71								
Ahorros anuales		Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98				
Valor de Salvamento									
Flujos netos	-Q 9,128.71	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98				
Flujos acumulados	-Q 9,128.71	-Q 7,770.73	-Q 6,412.75	-Q 5,054.77	-Q 3,696.79	-Q 2,338.81	-Q 980.83	-Q 377.15	
Periodo de recuperación (años)	7.72								
TMAR (10%)	1	0.909090909	0.826446281	0.751314801	0.683013455	0.620921323	0.56447393	0.513158118	
VP	-Q 9,128.71	Q 1,234.53	Q 1,122.30	Q 1,020.27	Q 927.52	Q 843.20	Q 766.54	Q 696.86	
VPN	Q1,248.07								
Relación costo-beneficio	2.25								
ROI	125%								

Cuadro 28
Resultados del análisis de económico

Factor	Año							
	8	9	10	11	12	13	14	15
Inversión inicial								
Ahorros anuales	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98
Valor de Salvamento								Q 200.00
Flujos netos	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,357.98	Q 1,557.98
Flujos acumulados	Q 1,735.13	Q 3,093.11	Q 4,451.09	Q 5,809.07	Q 7,167.05	Q 8,525.03	Q 9,883.01	Q 4,651.09
Periodo de recuperación (años)	7.72							
TMAR (10%)	0.46650738	0.424097618	0.385543289	0.350493899	0.318630818	0.28966438	0.263331254	0.239392049
VP	Q 633.51	Q 575.92	Q 523.56	Q 475.96	Q 432.69	Q 393.36	Q 357.60	Q 372.97
VPN	Q1,248.07							
Relación costo-beneficio	2.25							
ROI	125%							

Cuadro 29
Continuación de los resultados del análisis de económico

VII. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Carga térmica

Para realizar el cálculo de la carga térmica del recinto en función a la temperatura exterior es necesario conocer las características físicas del ambiente, así como la cantidad de personas que recurren frecuentemente el lugar y los equipos que se encuentran en el interior que puedan contribuir con calor. Para este estudio se consideró que el área a climatizar sería la habitación de Sala – Comedor cuyas dimensiones (Alto, ancho, largo, volumen y área total) se presentan en el Cuadro 6. Así mismo, se consideró también las especificaciones de las paredes del recinto (Este, Oeste, Sur y Norte) cuyas características como material, espesor, alto, largo y área se encuentran en el Cuadro 7. En el Cuadro 8 se especifican las aberturas que tiene el recinto ya que se le restan a el área de las paredes, en donde, se consideraron dos ventanas y una puerta. Cabe destacar que muchos de los cálculos están dimensionados en base al sistema inglés ya que las tablas consultadas y utilizadas en los libros de texto, así como al momento de seleccionar equipos, se encuentran en dichas unidades.

Se empleó la aplicación de ASHRAE CLIMATIC DESIGN CONDITIONS la cual brinda información sobre diversos temas climáticos en distintos rincones del mundo, en este estudio, se empleó para consultar las condiciones anuales de diseño de calefacción y humidificación especificadas en el Cuadro 9, así como las condiciones anuales de diseño de refrigeración, deshumidificación y entalpía exteriores. Conocer estos datos son necesarios para el cálculo de la carga térmica ya que se tienen que especificar tanto para temperaturas externas como internas las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo. Para hacer las mediciones, se utiliza un instrumento llamado psicrómetro. Las temperaturas indicadas por el psicrómetro se denominan temperaturas de bulbo húmedo y temperaturas de bulbo seco. Se denomina bulbo húmedo ya que en uno de los bulbos del aparato se encuentra cubierto con un algodón húmedo mientras el otro no (seco). Para calcular la humedad relativa del aire, la cual es una medida importante para conocer el confort de las personas en la estancia, así como para el diseño de los sistemas de climatización, es necesario determinar las temperaturas anteriormente mencionadas.

Para el cálculo de la carga térmica es necesario el cálculo de la conducción térmica en las paredes en las cuales no incide el sol, las cuales son las paredes Este, Oeste y Sur. Para este estudio se asumieron paredes de bloques huecos de hormigón de 8 pulgadas de espesor con agregado de grava. Para el Coeficiente de Transferencia de Calor (U) se empleó la Tabla 4- 6 (McQuiston, Parker, & Spitler, 2008), en donde se asumió una pared lisa sin acabado de interiores, con un coeficiente U igual a 0.56. Para las tres paredes, se calculó una conducción térmica (Q) de 944.26 BTU/h. Para la pared Norte, el cálculo de la conducción térmica fue diferente ya que se establecieron horas específicas (en intervalos de 2 horas) para verificar cuál era una hora crítica que afectara la temperatura de la pared de manera significativa.

Para la puerta que se encuentra en la estancia se asumió una puerta sólida de madera de 1 1/2 pulgadas de espesor. Así mismo, se empleó la tabla con un coeficiente de transferencia de calor (U) de 0.49 establecido en la Tabla 4-16 del libro Calefacción, ventilación y aire acondicionado, obteniendo una conducción térmica (Q) igual a 56.96 BTU/h. Para el calor debido a los ocupantes se empleó la tabla 10-3 Ganancia de calor de personas (McQuiston, Parker, & Spitler, 2008) en donde se asumió que, debido al uso que se tiene en el recinto, en este caso una sala y comedor, se especificó que el tipo de actividad que las personas estarían realizando sería un trabajo muy ligero y sentados, por lo que el calor total disipado tomando en consideración 4 personas adultas es de 800 BTU/h (calor sensible) y 1000 BTU/h (calor latente).

En el Cuadro 16 se especifica la ganancia de calor debido a los equipos que, en este caso, se consideraron solamente un televisor con una potencia de 150W y 5 luminarias con una potencia de 15W cada una, obteniendo una ganancia de calor de 76.79 BTU/h y 255.98 BTU/h respectivamente. Para este cálculo era necesario conocer el calor sensible de los equipos en donde se utilizó la tabla 17-11 (McQuiston, Parker, & Spitler, 2008) que especifica la carga de calor de diferentes equipos, es decir, la disipación del calor durante el funcionamiento.

En los cuadros 17 y 18 se especifica el cálculo de la conducción térmica del techo y piso respectivamente. Para dicho cálculo se empleó la tabla 4-11 (McQuiston, Parker, & Spitler, 2008), la cual contiene los coeficientes de transmisión (U) para pisos y techos construidos de hormigón o concreto en donde se asumió un techo de hormigón con aislamiento de 1/2 pulgadas y un coeficiente de 0.64 mientras que, para el piso, se asumió el tipo D con 6 pulgadas de espesor y un coeficiente de 0.41. La conducción térmica del techo y piso fue de 5666.32 BTU/h y 623.90 BTU/h respectivamente. Como se puede apreciar la conducción térmica de estos dos elementos es mucho mayor que la de los calculados anteriormente, esto debido a la incidencia del área que se abarca la cual representa toda la habitación.

Para el calor infiltrado se tiene especificado en el Cuadro 19 una ventana metálica de bastidor simple (residencial) y una puerta bien ajustada con un aire infiltrado en cada una de ellas de 52 y 54 ft³/h respectivamente. Se utilizó la herramienta The Sugar Engineers - Cálculos psicométricos la cual especifica que las formulaciones utilizadas para calcular las propiedades del aire húmedo se basan en las relaciones de gases perfectos publicadas en el Manual de fundamentos de ASHRAE de 1989. Con la ayuda de esta herramienta se pudo realizar el cálculo de la humedad específica y densidad del aire para tener así una infiltración de 10.27 BTU/h y una infiltración latente de -4.72 BTU/h. Finalmente, se realizó la suma de todas las cargas consideradas y se obtuvo que la carga térmica total del recinto es de 9392.79 BTU/h. Uno de los equipos seleccionados para realizar el análisis comparativo es el Aire acondicionado AT122CB de la marca Hisense ya que cubre los 9392.79 BTU/h y es el más económico de su segmento. Así mismo, se cotizó en base a la carga térmica necesaria una bomba de calor Mini Split Xpower de la marca Carrier para llevar a cabo el análisis comparativo.

B. Emisiones de GEI en cada equipo

Al realizar el análisis detallado que involucra cálculos relacionados con el consumo de energía eléctrica y las emisiones de gases de efecto invernadero, específicamente en un escenario de uso de ocho horas diarias durante todo un año, se ha llegado a importantes conclusiones en relación con los dos equipos de climatización analizados.

A continuación, se detallan los resultados obtenidos tanto para el equipo de aire acondicionado convencional modelo AC122CE de la marca Hisense como de la bomba de calor modelo Mini Split Xpower de la marca Carrier.

El estudio revela que el equipo de aire acondicionado convencional, el modelo AC122CE de la marca Hisense, consume una cantidad sustancial de energía eléctrica, totalizando 1111.81 kilovatios-hora (kWh) al año. Esto, a su vez, se traduce en la emisión de un total de 2217.17 kilogramos equivalentes de dióxido de carbono (Kg CO₂e) al ambiente debido a las operaciones del equipo. Por otro lado, la bomba de calor modelo Mini Split Xpower de la marca Carrier registra un consumo eléctrico anual significativamente inferior, alcanzando los 113.296 kWh, lo que equivale a emisiones de tan solo 225.93 Kg CO₂e al año.

Los cálculos presentados ponen de manifiesto una diferencia sustancial en el consumo de electricidad entre estos dos sistemas de climatización, con el equipo de aire acondicionado convencional siendo notablemente menos eficiente desde el punto de vista energético, con un consumo eléctrico siendo 89.8 % superior al de la bomba de calor. Esta disparidad se debe en gran medida al muy bajo coeficiente de eficiencia energética estacional (SEER) de tan solo 2.91 en el aire acondicionado convencional, mientras que la bomba de calor cuenta con un coeficiente SEER muy alto, específicamente de 25. Esta disparidad en la eficiencia se traduce en una marcada diferencia en las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que el aire acondicionado convencional emite 2,217.17 Kg CO₂e al año, mientras que la bomba de calor emite solamente 225.93 Kg CO₂e. Estos resultados resaltan de manera evidente la importancia de seleccionar equipos de climatización con altos coeficientes de eficiencia energética estacional, ya que, además de reducir el consumo de energía eléctrica, contribuyen significativamente a la mitigación de la contaminación ambiental al generar menos emisiones de gases de efecto invernadero.

Es relevante mencionar que el aire acondicionado convencional posee una funcionalidad limitada al solo poder enfriar el espacio en el que se encuentra instalado. Si se requiere calefacción, se debe recurrir a un sistema adicional, lo que resulta en un aumento aún mayor del consumo de electricidad, emisiones de gases de efecto invernadero y costos asociados al consumo de energía.

En resumen, los datos obtenidos demuestran que las bombas de calor con coeficientes de eficiencia energética estacional elevados representan una elección mucho más eficiente desde el punto de vista energético, consumiendo menos energía para lograr la misma tarea de enfriamiento en comparación con los sistemas de aire acondicionado convencionales con baja eficiencia. Este enfoque no solo conlleva beneficios en términos de ahorro de energía, sino que también tiene un impacto positivo en la reducción de la contaminación ambiental al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

C. Costos asociados a cada equipo

Como se puede observar en el cuadro 26 para el cálculo del costo de operación para cada equipo considerando Q 1.36/kWh para una tarifa no social, así como un uso diario de 8 horas (se eligieron 8 horas ya que se considera un estándar que una persona trabajaría y emplearía el sistema) se obtuvo, de los cálculos realizados anteriormente, para el aire acondicionado

tradicional modelo AT122CB de la marca Hisense, que este consume al año 1,111.81 kWh lo cual se traduce en un costo de operación al año de Q1,512.06, mientras que, la bomba de calor Mini Split Xpower de la marca Carrier, consumiendo al año 113.296 kWh obtuvo un costo de operación anual de tan solo Q154.08. Esto significa que existe una diferencia abismal tanto en el consumo de energía como en los costos de operación, en donde, con la implementación de la bomba de calor se tendrían ahorros anuales de Q1,357.98 en el costo de operación, uno de los más importante al momento de evaluar la implementación de alguno de los dos equipos.

Por otra parte, en el Cuadro 27 se recopilan los demás costos asociados a la implementación de ambos sistemas. Es importante destacar que la inversión inicial es significativamente mayor en el caso de implementar la bomba de calor como sistema de climatización, con un costo total de Q9,128.71, en contraste con el costo inicial del aire acondicionado convencional de Q3,999.00. Esto se debe en gran medida a su funcionalidad dual que permite brindar refrigeración y calefacción en un solo sistema, la calidad de sus componentes y la complejidad de su instalación. Además, las bombas de calor son un producto relativamente nuevo en el mercado, lo que puede limitar su producción y aumentar su costo. Por otro lado, los aires acondicionados convencionales han estado en el mercado durante mucho tiempo y su producción se ha optimizado a lo largo de los años, lo que ayuda a reducir sus costos de fabricación. Sin embargo, el costo estimado de mantenimiento anual es más elevado para el aire acondicionado tradicional, ascendiendo a Q2,400, mientras que el mantenimiento de la bomba de calor se reduce a Q1,180.38, debido a que este sistema, al ser más sencillo, requiere menos intervenciones de mantenimiento anual.

D. Análisis económico

El análisis económico se realizó mediante el uso de la herramienta Microsoft Excel, y el resumen de los resultados se presentan en los cuadros 28 y 29. El objetivo principal de la realización de este análisis fue evaluar la viabilidad económica de la adopción de la bomba de calor aire-aire modelo Mini Split Xpower de la marca Carrier en comparación con el uso del aire acondicionado tradicional modelo AC122CE de la marca Hisense, durante un horizonte de análisis de 15 años, tomando en cuenta que es el ciclo de vida mínimo para una bomba de calor aire - aire.

El análisis consideró varios factores financieros clave, comenzando con la inversión inicial requerida para cada sistema. Se observó que la inversión necesaria para la bomba de calor ascendía a Q9,128.71, lo cual es notablemente superior a la inversión inicial para el aire acondicionado convencional, que asciende a tan solo Q3,999.00.

Sin embargo, el análisis también evaluó detenidamente los costos operativos anuales de ambos equipos en términos de consumo de energía eléctrica. Se determinó que el costo anual de operación para el aire acondicionado era de Q1,512.06, mientras que para la bomba de calor era significativamente más bajo, situándose en Q154.08. Esta disparidad de costos anuales se tradujo en ahorros sustanciales si se optaba por la bomba de calor, con una diferencia anual de Q1,357.98 en ahorros operativos.

En base a los flujos de efectivo acumulativos, se calculó el periodo de recuperación de inversión, que se estima en aproximadamente 7 años y 8 meses. Esto significa que se espera que transcurran aproximadamente 7 años para que los flujos de efectivo generados por esa inversión iguallen o recuperen la inversión inicial realizada en el proyecto. En otras palabras, después de 7 años y 8 meses, se anticipa que los beneficios acumulados del proyecto habrán cubierto los costos iniciales de la inversión.

Además, se aplicó una tasa mínima de retorno del 10 % para calcular el Valor Presente Neto (VPN), que arrojó un resultado positivo de Q1,248.07. Este resultado indica que los flujos de efectivo futuros esperados superan el valor presente de la inversión inicial, lo que sugiere que el proyecto tiene el potencial de generar un rendimiento neto positivo, es decir, la implementación de la bomba de calor resulta en una acertada decisión financiera.

En términos de la relación costo-beneficio (BCR), se obtuvo un valor de 2.25, que es superior a 1, lo que indica que el proyecto es financieramente favorable. Esto significa que los beneficios generados superan significativamente los costos totales, lo que es un indicador positivo de la viabilidad económica de la inversión. En otras palabras, se espera que los beneficios económicos (como los ahorros en costos de energía) de invertir en bombas de calor sean 2.25 veces mayores que los costos iniciales de la inversión. Esto sugiere que la inversión en bombas de calor podría ser muy rentable desde una perspectiva económica.

Finalmente, se calculó el Retorno de la Inversión (ROI) con un valor del 125 %. Este resultado es notablemente superior a la Tasa Mínima Aceptable de Retorno (TMAR) considerada, lo que indica que la inversión en la bomba de calor podría generar un rendimiento del 25 % sobre el costo de la inversión inicial. Esto representa un rendimiento muy favorable y sugiere que la inversión está superando las expectativas en términos de rentabilidad financiera.

E. Recomendaciones para para el proceso de instalación, mantenimiento y control de una bomba de calor aire – aire:

En este apartado lo que se pretende es establecer recomendaciones generales en relación con el procedimiento de instalación, mantenimiento y control de una bomba de calor aire-aire. No obstante, es fundamental destacar que no se pretende crear una guía rígida que deba seguirse de manera estricta, sino que se busca complementar, con buenas prácticas de instalación, monitoreo y control, los manuales propios de cada equipo proporcionados por las respectivas compañías fabricantes. Se deben seguir rigurosamente las instrucciones de los fabricantes y las de cualquier diseñador empleado.

1. Consideraciones importantes al momento de instalar una bomba de calor:

- a) Contar con un espacio adecuado que garantice acceso para mantenimiento, servicio, ajuste de puntos y/o válvulas de flujo, lectura de contadores, etc. De igual manera, asegurarse que el espacio garantice que los tramos de tubería sean del tamaño correcto, para minimizar curvaturas o cambios innecesarios de dirección, y estén bien apoyados y aislados donde sea requerido. Es importante que el lugar de instalación de la unidad exterior este ubicada en un área con buena ventilación y sin obstrucciones del flujo de aire.

- b) Asegurarse que el proveedor proporcione un manual o guía clara de operación y mantenimiento que incluya los repuestos recomendados, así como datos de contacto, para todas las partes relevantes y principales proveedores de equipos.
 - c) Se debe tener especial cuidado en la ubicación de la zona exterior de la unidad de una bomba de calor de fuente de aire para garantizar flujo de aire adecuado y que la unidad no pueda causar un problema de ruido a los ocupantes o vecinos.
- 2. Consideraciones en el mantenimiento:** Es fundamental distinguir entre el mantenimiento de la bomba de calor en sí y el mantenimiento del sistema de calefacción y refrigeración. Es imperativo seguir siempre las recomendaciones del fabricante, y es poco probable que se requiera más de una inspección de servicio al año. El mantenimiento de una bomba de calor aire-aire es esencial para garantizar su eficiencia y durabilidad a lo largo del tiempo. A continuación, se presenta una guía preliminar con consejos para el mantenimiento de una bomba de calor aire-aire:
- a) Al momento de realizar cualquier trabajo de mantenimiento sobre la bomba de calor se debe asegurar antes de apagar la energía eléctrica que permite el funcionamiento de esta, con el objetivo de evitar accidentes tanto para el equipo como para las personas que realizarán el mantenimiento.
 - b) Se debe mantener limpias tanto las unidades interiores como las exteriores que conforman la bomba de calor. Es importante retirar cualquier tipo de obstrucción como hojas, escombros y suciedad de las unidades exteriores, así como realizar una limpieza regular a los filtros de aire de las unidades interiores, con el objetivo de garantizar un flujo de aire adecuado y prolongar la vida útil de la bomba de calor mediante un óptimo rendimiento.
 - c) Se deben seguir las instrucciones del fabricante en cuanto al reemplazo de los filtros de aire del equipo ya que si estos se encuentran sucios pueden perjudicar la eficiencia de la bomba de calor, así como la calidad del aire en el interior del recinto.
 - d) Es necesario inspeccionar de manera regular las conexiones de tuberías, así como las conexiones eléctricas con el objetivo de identificar posibles fugas que se puedan tener, ya sea por parte del refrigerante o bien problemas eléctricos.
 - e) Es recomendable hacer anualmente un mantenimiento profesional a la bomba de calor, en donde se verifique que todo funciona correctamente y se comprueben temas como el de la presión del refrigerante, limpieza del evaporador y el condensador, y asegurarse de que todas las partes estén en buen estado de funcionamiento.
 - f) Es importante verificar que el termostato funcione correctamente y esté configurado a la temperatura deseada. Para ello se debe comprobar que las baterías funcionen.
 - g) Se recomienda hacer un mantenimiento estacional específico antes de la temporada de calefacción y otro antes de la temporada de refrigeración. Esto con el objetivo de asegurar que la bomba de calor esté lista para funcionar de manera eficiente durante todo el año.

- h) Se recomienda a todos los usuarios llevar un registro de mantenimiento describiendo todas las tareas de mantenimiento realizadas, así como las fechas en las que se llevaron a cabo, con el objetivo de llevar un seguimiento y programar a tiempo los futuros mantenimientos.
- 3. Consideraciones en el área de control:** El control adecuado de una bomba de calor aire-aire es fundamental para mantener el confort dentro del recinto climatizado, manteniendo una temperatura interior cómoda y eficiente en términos energéticos.
- a) Se recomienda ajustar la temperatura de forma gradual y evitar cambios abruptos de temperatura. Esto ayuda a minimizar el consumo de energía eléctrica del equipo, así como mantener un ambiente interior confortable.
 - b) No se recomienda apagar y encender la bomba de calor constantemente ya que esto perjudica la eficiencia del equipo. Se debe mantener una temperatura constante cuando se esté empleando ya que cuando la bomba de calor trabaja de manera continua es más eficiente.
 - c) Para tener un mejor manejo y control de la bomba de calor se recomienda verificar que el recinto que se desea climatizar esté libre de fugas de aire, ya sea en las puertas o en las ventanas, ya que dichas fugas pueden afectar de manera negativa la eficiencia de la bomba de calor. Es por ello que, en caso de encontrar fugas, estas se deben sellar para lograr mantener la temperatura y confort deseados.
 - d) Para tener un mejor control y monitoreo es recomendable verificar el consumo de energía eléctrica de la bomba de calor con el objetivo de identificar cualquier cambio inusual en cuanto al uso de energía lo cual podría indicar un problema en el sistema y evitar así tener un mayor consumo eléctrico.
 - e) Es recomendable emplear las características de ahorro de energía propias de las bombas de calor, como el manejo del ventilador a una velocidad variable, entre otras, con el objetivo de optimizar el rendimiento y reducir los costos operativos.

VIII. CONCLUSIONES

El equipo de aire acondicionado convencional es menos eficiente energéticamente que la bomba de calor, consumiendo un 89.8 % más de electricidad. Esta eficiencia se atribuye al alto coeficiente SEER (25 BTU/h) de la bomba de calor. Así mismo, el aire acondicionado convencional emite 2,217.17 Kg CO₂e al año, mientras que la bomba de calor solo emite 225.93 Kg CO₂e. Por lo tanto, seleccionar equipos de climatización con altos coeficientes SEER puede reducir el consumo de energía y las emisiones de GEI.

El análisis de costos muestra que la bomba de calor es más eficiente en términos de consumo de energía y costos de operación en comparación con el aire acondicionado convencional. A pesar de su mayor costo inicial, la bomba de calor puede generar ahorros anuales de Q1,357.98 y requiere menos mantenimiento. El periodo de recuperación de la inversión es de aproximadamente 7 años, con un Valor Presente Neto (VPN) positivo de Q1,248.07, una relación costo-beneficio (BCR) de 2.25 y un Retorno de la Inversión (ROI) del 125 %. Esto indica que la bomba de calor es una inversión viable y rentable a largo plazo desde un punto de vista económico y energético.

En el proceso de instalación de una bomba de calor, es esencial asegurarse de contar con un espacio adecuado que permita el acceso para mantenimiento y servicio, así como garantizar que las tuberías estén correctamente dimensionadas y aisladas siguiendo debidamente el manual de operación y mantenimiento del proveedor.

En conclusión, las bombas de calor destacan como una opción eficiente y versátil en comparación con los sistemas de aire acondicionado convencionales. Su mayor eficiencia energética, medida a través del SEER, conduce a menores costos operativos y un menor consumo eléctrico. Además, su capacidad para proporcionar tanto calefacción como refrigeración en un solo equipo simplifica la inversión inicial y el ahorro de espacio, lo que resulta especialmente beneficioso en viviendas con limitaciones de espacio o en entornos comerciales. En resumen, las bombas de calor ofrecen una solución integral y eficiente para el acondicionamiento de espacios, mejorando la comodidad y reduciendo los costos a lo largo del tiempo.

IX. RECOMENDACIONES

Para realizar este análisis siguiendo esta metodología se recomienda la consulta de profesionales especializados desde el inicio del proceso de evaluación de la viabilidad de la instalación de bombas de calor como sistemas de climatización sostenible. La intervención de estos expertos resulta fundamental, dado que aportan, en base a sus conocimientos, información precisa y actualizada acerca de las ventajas, desventajas y características inherentes a estas tecnologías. Así mismo, los expertos pueden validar que el diseño sea adecuado según las necesidades específicas, teniendo en cuenta factores como la capacidad de la bomba de calor, la ubicación geográfica, la eficiencia energética, entre otros. De esta manera, se garantiza una selección de equipos apropiada y un enfoque adecuado en la planificación de la climatización.

Se recomienda recopilar varias opciones provenientes de distintos proveedores tanto de aires acondicionados convencionales como de bombas de calor al momento de llevar a cabo un análisis comparativo. Esto permite tener la posibilidad de realizar una evaluación exhaustiva de las alternativas disponibles, lo cual posibilita la identificación detallada de las ventajas y desventajas inherentes a cada opción, tomando en consideración múltiples aspectos, tales como costos, eficiencia energética, impacto ambiental y comodidad. A partir de esta información, se logra tomar decisiones más fundamentadas y estratégicas, permitiendo así la selección de equipos que mejor satisfagan las necesidades requeridas, los objetivos de eficiencia energética predefinidos y el presupuesto.

X. BIBLIOGRAFÍA

- AFEC. (2022). *La Bomba de calor como sistema de climatización* | AFEC. <https://www.bombadecalor.org/noticias/la-bomba-de-calor-como-sistema-de-climatizacion>
- AlfaLaval. (2022). *Intercambiador de Calor - Definición, funcionamiento, Tipos, aplicaciones y mucho más*. <https://www.alfalaval.mx/productos-y-soluciones/transferencia-de-calor/intercambiadores-de-calor-de-placas/intercambiador-de-calor-que-es-y-como-funcional/>
- Arnabat, I. (2015). *Funcionamiento de la bomba de calor aire-agua*. <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/bombas-de-calor-reversibles-aire-agua-sistemas-integrales.html>
- Arnabat, I. (2016). *Funcionamiento de un aire acondicionado*. <https://www.caloryfrio.com/aire/acondicionado.html>
- BBC. (2019). *Qué son los gases CFC que destruyen la capa de ozono y que en su mayoría provienen de China*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-48390390>
- Carrier. (2022). *What Is a Heat Pump?*. <https://www.carrier.com/residential/fr/ca/products/heat-pumps/what-is-a-heat-pump-how-does-it-work/>
- ASIRCRA. (2022). *¿QUÉ SON LOS HFC?*. <https://asircra.com/noticias/hfc-gases-refrigerantes-sinteticos-hidrofluorocarbonos>
- Calisch, S. (2023). *Circuit Breaker: Heat Pumps emit less than high efficiency gas appliances in nearly every household in America*. *Rewiring America*. Recuperado de <https://www.rewiringamerica.org/circuit-breakers-heat-pumpsZealux>.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Termodinámica* (8a. Ed.). Mexico City: McGraw-Hill Interamericana.
- Del Amo. (2021). *La importancia de la climatización para garantizar el mayor confort y la máxima eficiencia*. <https://e-eficiencia.com/importancia-de-la-climatizacion-para-garantizar-confort-y-eficiencia/>
- Ecosistemas S.L. (2015). *Los orígenes del aire acondicionado con bomba de calor*. Retrieved 23 September 2022, from <https://www.ecosistemasdelsureste.com/news/los-origenes-de-la-bomba-de-calor/>
- Econova. (2022). *Bomba de Calor - Econova Institute*. Retrieved 5 September 2022, from <https://econova-institute.com/blog/bomba-de-calor-climatizacion-sostenible/>
- Espiñeira, P. (2022). *Bomba de Calor Hoy - funcionamiento e Implantación Para Calefacción*

y acs. <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/bomba-de-calor.html>

Factorenergía. (2018). *Energía eólica. Qué es, cómo funciona, ventajas y desventajas*. <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/energiaeolica>.

Girón, L. (2017). *¿Qué es la refrigeración y climatización?*. <https://girolan.net/blog/que-es-la-refrigeracion-y-climatizacion>

González, O. (2021). *Bomba de calor geotérmica*. <https://preciogas.com/instalaciones/geotermia/bomba-de-calor>

GASSERVEI. (2014). *Refrigerantes HFO*. <https://gas-servei.com/productos/refrigerantes/refrigerantes-hfo/>

González, G. (2023). *Tipos de aire acondicionado: ¿Cómo funcionan? ¿Cuál elegir?*. <https://preciogas.com/instalaciones/equipamiento/aire-acondicionado>

Government of Canada. (2022). *Heating and cooling with a heat pump. Natural Resources Canada*. <https://natural-resources.canada.ca/energy-efficiency/energy-star/Canada/about/energy-star-announcements/publications/heating-and-cooling-heat-pump/6817b3>

Grand View Research. (2020). *Heat Pump Market Size, Share And Trends [2023 Report]*. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/heat-pump-market> Biermeier, M.

Gumarov, A. (2019). *Bombas de calor*. <https://engineerx.decorexpro.com/>

Hilcu, M. (2021). *¿Qué es y cómo funciona la energía solar?*. <https://www.otovo.es/blog/energia/que-es-la-energia-solar/>

INSIVUMEH. (2020). *Regiones climáticas de Guatemala*. <https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2021/02/Variabilidad>

James. (2022). *Air Source Heat Pump Space Requirements*. Retrieved 7 February 2023, from <https://sourceheatpump.com/air-source-heat-pump>

J.A. Berstch. (2021). *Heat Pump Efficiency*. <https://jabertsch.com/heat-pumps/>

Luminita. (2023). *Highest Efficiency Heat Pumps In 2023 (Highest SEER + HSPF)*. <https://learnmetrics.com/highest-efficiency-heat-pumps-highest-seer-hsp>

McQuiston, F. C., Parker, J. D., & Spitler, J. D. (2008). *Calefacción, ventilación y Aire Acondicionado: Análisis y diseño*. Mexico: Limusa

Ministerio de Energía y Minas de Guatemala. (2018). *Plan Nacional de eficiencia energética*. <https://mem.gob.gt/>

Ministerio de Energía y Minas de Guatemala. (2020). *Energía Hidráulica*.

<https://mem.gob.gt/que-hacemos/area-energetica/energias-renovables/energia-hidraulica/>

NEEP. (2020). *Air Source Heat Pumps Buying Guide*. <https://neep.org/sites/default/files/resources/ASHPbuyingguide5>

Pennsylvania State University. (2022). *How Air Conditioners Work* | EGEE 102: Energy Conservation and Environmental Protection. <https://www.e-education.psu.edu/egee102/node/2104>

PEISA. (2021). *Sistemas de calefacción*. <https://peisa.com.ar/>

Rodríguez, A. (2021). HFO y bombas de calor: *Una solución ganadora para un futuro sostenible* - caloryfrio.com. <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/hfo-bombas-de-calor-solucion-futuro-sostenible.html>

Sánchez, A. (2015). *Bienestar térmico en un espacio climatizado*. <https://www.idae.es/articulos/bienestar-termico-en-un-espacio-climatizado>

Solórzano, A. (2022). *Estiman huella económica del sector construcción e inmobiliario en Q151 mil millones anuales*. <https://lahora.gt/secciones-para-ti/economia/andrea-solorzano/2022/01/31/estiman-huella-economica-del-sector-construccion-e-inmobiliario-en-q151-mil-millones-anuales/>

Sharma, P. et al. (2020). *Experimental characterization of a Sensible Heat Thermal Energy Storage using pebbles for charging*. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 912 042063

Silvia. (2019). *Cómo elegir una bomba de calor aire-aire*. <https://www.manomano.es/>

S&P. (2020). *Cálculo de cargas térmicas: conceptos básicos y métodos*. <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/calculo-cargas-termicas/> Stryi-Hipp, G. (2016). *Renewable heating and cooling*. Amsterdam: Elsevier.

Ultimate. (2023). *Soluciones de calefacción energéticamente eficientes en climas fríos*. <https://energy5.com/es/soluciones-de-calefaccion-eficientes-en-climas-frios>

United Nations Environment Programme. (2021). *What you should know about sustainable cooling*. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/what-you-should-know-about-sustainable-cooling> Joshi, S. (2008). The sick building síndrome

Vaillant. (2022). *Bomba de calor*. <https://www.vaillant.es/arothersplit/>

Viessmann. (2018). *Bomba de calor split aire/agua: Climatización económica y limpia*. <https://www.viessmann.es/es/edificios-de-viviendas/bombas-de-calor/bombas-de-calor-de-aireagua-split.html>

Wiese. (2022). *¿Qué es la sostenibilidad ambiental y cómo impacta en nuestras vidas?*. <https://www.fundacionwiese.org/blog/es/que-es-la-sostenibilidad-ambiental-y-como-impacta-en-nuestras-vidas/>

Whirlpool. (2003). *Heat Pump Installation Instructions*. <http://www.whirlpoolcomfort.com/>

Wright, C. (2021). *Next-Generation Air Conditioners and Heat Pumps for a More Sustainable Future*. <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=135>

XI. ANEXOS

A. Tablas empleadas en los cálculos de carga térmica

Tabla 4-6 Coeficientes de transmisión (U) para paredes de mampostería

Bloques huecos de hormigón	Espesor (plg)	Paredes lisas sin acabados interiores	Yeso (1/2") sobre las paredes
Agregado de grava	8	0.56	0.52
	12	0.49	0.46

Tabla 4-16 Coeficientes de transmisión (U) para puertas de madera sólida

Espesor nominal (plg)	Espesor real (plg)	U Puerta expuesta	U Puerta con vidrio guardapuerta
1	2 3/8	0.64	0.37
1 1/4	1 1/16	0.55	0.34
1 1/2	1 5/16	0.49	0.32
1 3/4	1 3/8	0.48	0.31
2	1 5/8	0.43	0.28
2 1/2	2 1/8	0.36	0.26
3	2 5/8	0.31	0.23

Tabla 10-3 Ganancias de calor de personas

Tipo de actividad	Tipo de aplicación	Calor total disipado, hombres adultos (Btuh)	Calor total disipado, modificado* (Btuh)	Calor sensible (Btuh)	Calor latente (Btuh)
Sentados en reposo	Teatro	390	330	180	150
Sentados; trabajo muy ligero	Oficinas, hoteles, apartamentos, restaurantes	450	400	195	205
Trabajo moderadamente activo	Oficinas, hoteles, apartamentos	475	450	200	250

Tabla 17-11 Carga de calor de equipo

Tipo de actividad	Disipación de calor durante el funcionamiento (Btuh)	
	Calor sensible	Calor latente
Alumbrado eléctrico y accesorios, por kilowatt instalado	3413	N/A
	511.95	N/A

Tabla 4-11 Coeficientes de transmisión (U) para pisos y techos contruidos de hormigón

Tipo de cielo	Espesor del hormigón (plg)	Tipo de piso
		En tablado de madera sobre hormigón
Sin cielo falso	6	0.41