

EVALUACIÓN COMPARATIVA ENTRE LAS TECNOLOGÍAS TRADICIONALES
DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN PARA UN SISTEMA DE AIRE
ACONDICIONADO CENTRAL FRENTE A LAS BOMBAS DE CALOR
GEOTERMICO, CASO DE ESTUDIO: ZONA RESIDENCIAL THE GROVE
APARTMENTS, MASSACHUSETTS

JULIANA PARRA LLORET

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2020

EVALUACIÓN COMPARATIVA ENTRE LAS TECNOLOGÍAS TRADICIONALES
DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN PARA UN SISTEMA DE AIRE
ACONDICIONADO CENTRAL FRENTE A LAS BOMBAS DE CALOR
GEOTERMICO, CASO DE ESTUDIO: ZONA RESIDENCIAL THE GROVE
APARTMENTS, MASSACHUSETTS

JULIANA PARRA LLORET

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO
AMBIENTAL

DIRECTOR
JUAN JOSE VARGAS OSORIO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2020

TABLA DE CONTENIDO

Lista de tablas	4
Lista de gráficas	5
Lista de figuras	6
Resumen	7
Abstract	8
1. Introducción	9
2. Diagnostico	10
2.1 Caracterización de la empresa	10
2.2 Estado energético del sector residencial y de construcción	11
2.3 Caracterización climatológica de Boston-Massachusett	12
2.4 Cálculo de la demanda energética del sistema de aire central	13
2.5 Compromisos ambientales del estado de Massachusetts	16
3. Propuesta y posibilidades de reconversión energética	16
3.1 Sistema horizontal de bombas de calor Geotérmico de circuito cerrado	17
3.2 Cálculo de las cargas térmicas y elección del equipo	18
3.3 Gráfica psicométrica para el sistema de climatización del apartamento	20
3.4 Costos anuales de operación	21
4. Conclusiones y recomendaciones	27
5. Bibliografía	29

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Medidas del apartamento.	11
Tabla 2: Caracterización climatológica de Massachusetts.	13
Tabla 3: Consumo promedio en BTU de diferentes equipos en una casa.	14
Tabla 4: Cargas térmica por ft ² .	19
Tabla 5: Costos anuales por enfriamiento.	22
Tabla 6: Costos anuales por calefacción.	23
Tabla 7: Costo total de instalación de un sistema de bombas de calor geotérmico.	24
Tabla 8: Precio de venta del departamento para el caso tradicional y optimizado.	24
Tabla 9: Flujo de caja del cliente.	25

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Porcentaje de empresas que están haciendo y/o harán más del 60% de proyectos verdes.	12
Gráfica 2: Uso anual de energía	15
Gráfica 3: Consumo de energía por uso final.	15
Gráfica 4: psicométrica de climatización para el apartamento en estudio.	21

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Hoja de entrada para el cálculo de cargas.	18
Figura 2: Cargas totales.	19
Figura 3: Especificaciones técnicas de una unidad Bosch Geothermal Heat Pumps.	20
Figura 4: Requisitos de crédito fiscal para geotermia.	26

RESUMEN

Este documento consiste en proponer una solución a las altas demandas de gas natural y electricidad por sistemas de climatización en los hogares, aplicado para el caso de estudio con la empresa *NEI General Contracting*, para la cual se plantea entonces una evaluación comparativa entre las tecnologías tradicionales frente a las bombas de calor geotérmico de circuito cerrado, a través del cálculo de las cargas térmicas de refrigeración y calefacción del apartamento para la elección del tamaño y capacidad del equipo correcto, haciendo uso del software *Chvac-Commercial HVAC Loads*. Finalmente se realiza un análisis de costos anuales de los equipos y se evalúa la factibilidad financiera de la inversión tanto para el futuro cliente como para la empresa.

Palabras claves: Sistema de Climatización, Refrigeración, Calefacción, Industria de Construcción, Costos Energéticos.

ABSTRACT

This project consists of proposing a solution to the high demands of natural gas and electricity for air conditioning systems in homes, applied to the case study with the company NEI General Contracting, for which a comparative evaluation between traditional technologies is then proposed compared to closed circuit geothermal heat pumps, through the calculation of the unit's heating and cooling thermal loads to choose the correct equipment size and capacity, making use of the Chvac-Commercial HVAC Loads software. Finally, an analysis of the annual costs of the equipment is carried out and the financial feasibility of the investment is evaluated for both the future client and the company.

Keywords: HVAC System, Heating, Cooling, Construction Industry, Energy Costs.

1. INTRODUCCIÓN

NEI General Contracting es una empresa que cuenta con 20 años de experiencia en el mercado. Se ubica en la ciudad de Randolph, Massachusetts y se encarga de la contratación general, y del desarrollo de proyectos de construcción residencial incluyendo su diseño y gestión. Actualmente se encuentra en etapa de planeación, la construcción de un complejo residencial llamado *The Grove Apartments*, situado en la ciudad de Boston, Massachusetts. Dicho proyecto es el escogido para este caso de estudio; y para el cual se tiene planificado instalar sistemas de aire acondicionado de tipo aire central, compuesto por dos equipos principales, los cuales son: una unidad condensadora encargada del enfriamiento (Amana ASX130181D) y, un horno a gas natural (Rheem Classic RGLQ05) para la calefacción. Ambos se encuentran conectados a ductos de aluminio que distribuyen el aire acondicionado y lo expulsan a través de rejillas por toda la casa. Sin embargo, este es un sistema convencional y con altos consumos de energía eléctrica en el caso del enfriamiento y alta demanda de gas natural por parte de los hornos de calefacción (Furnaces and Boilers, 2020). Por esta razón, se decidió realizar una evaluación comparativa entre el sistema de aire acondicionado central y bombas geotérmicas.

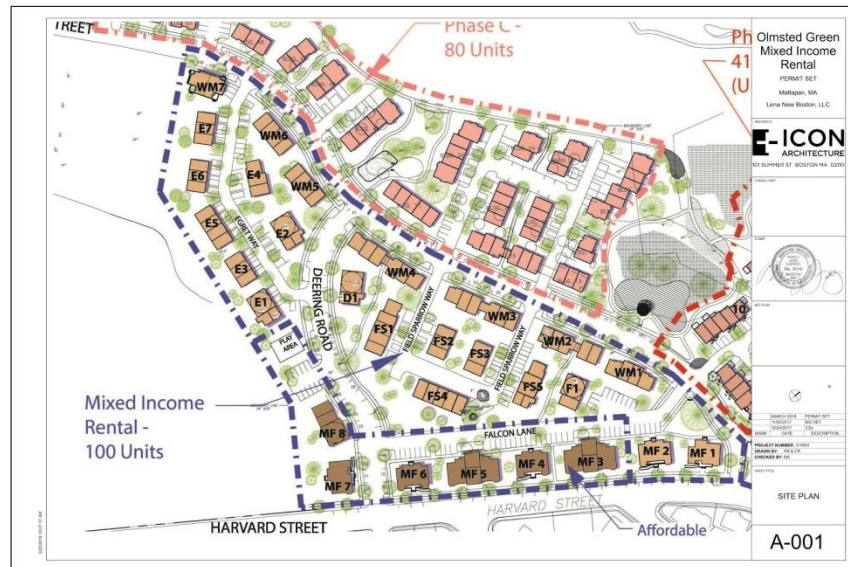
Ahora, si bien es cierto, que los edificios y el desarrollo brindan innumerables beneficios a la sociedad, también aportan impactos ambientales significativos (U.S. EPA, 2009). De la misma forma y según un reporte realizado por el World Green Building Council, los edificios existentes actualmente son responsables de más del 40% del total mundial del consumo de energía (Dodge Data & Analytics, 2018). Desde una perspectiva más local, conforme a las estadísticas proporcionadas por la Administración de información energética (*EIA*) de los Estados Unidos, en Massachusetts se usan 109 millones de Btu de energía por hogar al año, un 22% más que el promedio de EE. UU, dado que el clima en Massachusetts es más frío en comparación a otras áreas del país (New England, 1922). De dicho promedio de energía utilizado por hogar, el 59% corresponde a la calefacción de espacios (New England, 1922). Sumado a ello, se estima que las viviendas gastan alrededor de más de 2200 dólares al año en facturas de recibos, donde más de la mitad corresponden a calefacción y enfriamiento (Energy Star, 2005). En atención a lo anteriormente expuesto se identifica que existe un gran potencial de mejora, en la instalación de sistemas de calefacción y refrigeración que hagan uso de energías renovables y dejen de lados los combustibles fósiles, incentivando así la construcción sostenible y el aporte a la lucha contra el cambio climático y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. En este orden de ideas, este trabajo propone una alternativa para identificar potenciales medidas de ahorro y uso eficiente de la energía mediante la implementación de bombas geotérmicas para sistemas de calefacción y aire acondicionado. Igualmente se busca favorecer la reducción de costos de operación por parte de los propietarios, y así mismo aportar a la imagen de la empresa con diseños sostenibles.

2. DIAGNOSTICO

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA EMPRESA

El complejo residencial *The Grove Apartments* consta de múltiples edificios. El apartamento escogido para este caso de estudio, pertenece al edificio identificado con las letras WM2. (Imagen 1.)

Imagen 1: Complejo residencial *The Grove Apartments*.



Fuente: Autor

Dicho apartamento consta de 1010 ft² de área y se reparte entre dos baños, dos habitaciones, una sala, comedor y una cocina (Tabla 1.). Con base a esto se calculó el área total a acondicionar (925,5 ft²). Al mismo tiempo se realizó el inventario de ventanas, paredes, y techos, ya que como se verá más adelante son factores determinantes en el diseño de un sistema de climatización.

Tabla 1: Medidas del apartamento.

Espacio		Área (ft ²)
Piso 2	Cuarto 1	180,3
	Cuarto 2	180,3
	Baño 1	96,0
Piso 1	Baño 2	54,3
	Sala y comedor	305,9
	Cocina	108,7
Total		925,5

Muros	Ancho (ft)	Alto (ft)	Área (ft ²)
Pared N	16,1	15,8	254,38
Pared S	16,1	15,8	254,38

Muros	Largo (ft)	Alto (ft)	Área (ft ²)
Pared NO	32,5	15,8	513,5
Pared NE	32,5	15,8	513,5

Techo y Suelo	Ancho (ft)	Largo (ft)	Área (ft ²)
Techo exterior	16,1	32,5	523,25
Suelo	16,1	32,5	523,25

Número de ventanas	Sentido
3	Norte
7	Noreste
3	Sur

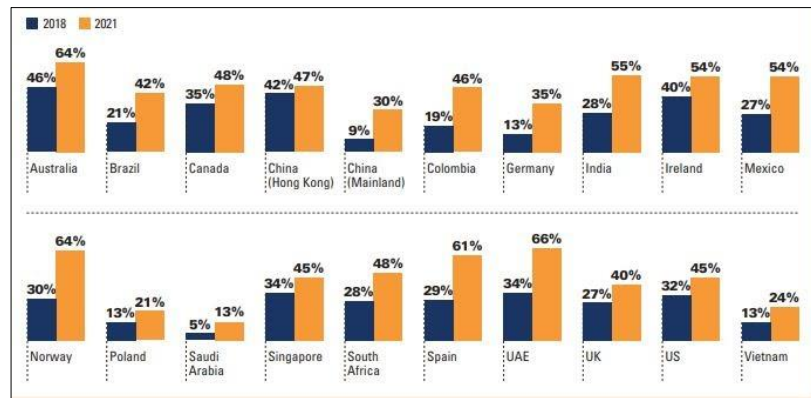
Fuente: Autor

2.2 ESTADO ENERGÉTICO DEL SECTOR RESIDENCIAL Y DE CONSTRUCCIÓN

Como ya se ha mencionado, las áreas principales requieren de aire acondicionado y hasta el momento la empresa (*NEI General Contracting*) pretende instalar un sistema de aire central. No obstante, este modelo de calefacción, ventilación y aire acondicionado (*HVAC*, por sus siglas en inglés) es tradicional y poco eficiente en comparación con las tecnologías disponibles que ya no usan combustibles fósiles (Furnaces and boilers, 2020). Frecuentemente los hornos utilizados para la calefacción utilizan gas natural, aunque algunos utilizan Diésel y Propano. A parte de ello, el estado de Massachusetts maneja temperaturas en invierno por debajo del punto de congelación. En consecuencia, es mayor la demanda de uso de este tipo de combustibles y la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero. Sin contar, con que la Administración de información energética (*EIA*) pronostica temperaturas más frías para la temporada de invierno 2020-21 (octubre-marzo), que a su vez subirá el consumo de gas natural residencial hasta un promedio de 21,1 mil millones de pies cúbicos por día (Yamashita & Ishida, 2000). Es decir que, en comparación con el invierno pasado, la *EIA* asume que los gastos en gas natural aumentarán en un 6%, la electricidad en un 7% y el propano en un 14% (Yamashita & Ishida, 2000). Es así, como resulta fundamental aplicar el concepto de vivienda

sostenible para evitar tanto el gasto innecesario de energía eléctrica como de combustibles fósiles. Con relación a ello, y según la encuesta realizada en el 2018 por el World Green Building Council, un 32% de las empresas participantes provenientes de Estados Unidos, construye la mayoría de sus proyectos (más del 60%) de forma ecológica; y se espera que para el 2021 el porcentaje sea de 45% (Gráfica 1.) (Dodge Data & Analytics, 2018). En efecto, el principal detonante que impulsa la demanda de la construcción ecológica, son las exigencias de los clientes [3], a pesar de ello siguen existiendo barreras, tales como los costos iniciales y las preocupaciones sobre la asequibilidad.

Gráfica 1: porcentaje de encuestados cuyas empresas han realizado más del 60% de proyectos verdes (2018 y esperado para 2021).



Fuente: (Dodge Data & Analytics, 2018)

Por último, es importante considerar la aplicación de nuevos modelos de refrigeración y calefacción, principalmente porque la demanda actual de Massachusetts excede la cantidad de gas natural que la infraestructura de gasoductos existente puede entregar a la región. Esto hace que los costos de energía al por mayor aumenten y los generadores dentro del área de control del Operador de Sistema Independiente de Nueva Inglaterra (ISO New England o ISONE), dependen del gas natural licuado (GNL) y del fuelóleo con alto contenido de carbono para generar electricidad y mantener la confiabilidad eléctrica (Morin, Lauwers, McCarey, & Judge, 2018).

2.3 CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA DE BOSTON-MASSACHUSETTS

En cuanto al diseño de un sistema de calefacción y refrigeración es importante conocer las condiciones climatológicas del área. Para este caso, Boston pertenece a la zona climatológica 5A, lo que indica que el clima en la zona es cálido-húmedo.

Además, a partir de la herramienta *Degree Days Calculator* ofrecida por Energy Star, se calcularon los días de grado de calefacción y enfriamiento en la ciudad de Boston. (Tabla 2.)

Tabla 2: Caracterización climatológica de Massachusetts.

BOSTON, MASSACHUSETTS	
Estación climatológica	LAURENCE G HANSCOM (725059)
periodo de tiempo	Febrero 01, 2019 - Enero 31, 2020
Clima	Cálido húmedo
Zona climatológica	5A
Criterios térmicos	Anual HDD:5754 °F Anual CDD:902 °F

Fuente: (Diebel, Norda, & Kretchmer, 2020; Global Sea Temperatures, 2020)
(En la tabla 4: *Annual HDD (Heating degree Day)* / Grado de calefacción día por año / *Annual CDD (Cooling Degree Day)*)

Como se puede notar en la tabla 2, el número de grados necesarios para calentar un edificio durante el periodo del 2019-2020 y obtener una temperatura confort mayor a 65°F fue de 5754°F. En otras palabras, es considerablemente mayor el número de grados necesarios de calefacción, en comparación al número de grados necesarios de enfriamiento, lo que coincide con el mayor gasto de energía concentrado en la calefacción de espacios.

2.4 CÁLCULO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE AIRE CENTRAL

La empresa planea construir viviendas con sistemas de aire central compuesto por una unidad condensadora Amana ASX130181D, y un horno de calefacción Rheem Classic Series Super Quiet 80. En este sentido, para determinar el consumo de energía de una vivienda con esos equipos, se recurrió a la literatura y se realizó un paralelo con el consumo de MMBTU/Mes en un año de un apartamento del mismo tamaño, y el mismo sistema con equipos similares a la del caso de estudio. Considerando de igual modo el consumo de energía de otros aparatos. (Tabla 3.)

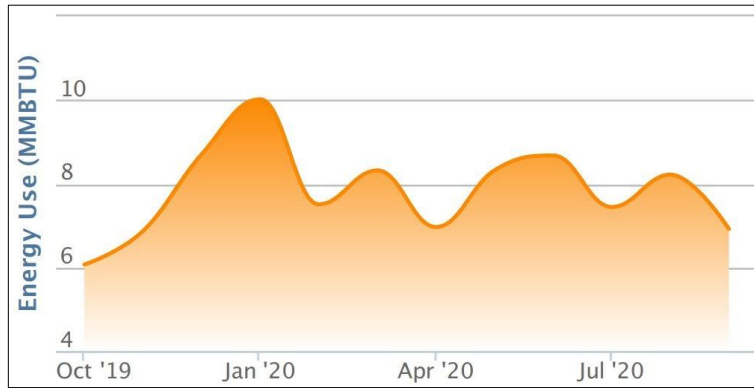
Tabla 3: Consumo promedio en BTU de diferentes equipos en una casa.

EQUIPOS	CONSUMO (Btu/h)	HORAS DE USO/DIA	CONSUMO Btu/DÍA
Luminarias	30, 7 (15 luminaria): 460,5 para 15 luminarias	10	4605
Computador	341,2	6	2047,2
TV	341,2	4	1364,8
Nevera	341,2	8	2729,6
Lavadora	1364,8	1	1364,8
Licuadaora	4776,9	0,1	477,7
Otros	750,7	1	750,7
Total	8376,5		13339

Fuente: (Ortiz, 2020)

Se utilizó la herramienta de Energy star (Home Energy Yardstick), la cual calcula el consumo energía en MMBTU/Mes de una casa. En este orden de ideas se introdujo: un rango de fechas (diciembre, 2019-noviembre, 2020), los pies cuadrados de la propiedad (925,5 ft²), el número de ocupantes (3) y los datos de facturas de servicios públicos de 12 meses correspondientes al rango de fechas. Dicho esto, se obtuvo que el consumo anual de energía de un apartamento con estas características, puede llegar hasta los 10,02 MMBTU/Mes durante la temporada de invierno, teniendo en cuenta que el 68% corresponde a la energía usada para calentar agua, cocinar, iluminar, y utilizar electrodomésticos y electrónica. (Gráfica 2.)

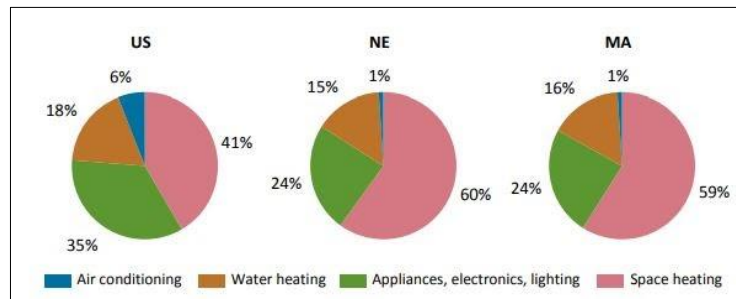
Gráfica 2: Uso anual de energía



Fuente: (Energy Star, 2020)

Entonces si se considera la resta entre el consumo total máximo de energía (10,02 MMBTU/Mes) y el consumo de los equipos electrónicos diferentes al sistema de aire acondicionado (6,87 MMBTU/Mes), el consumo energético del sistema de aire central es de 3,15 MMBTU/Mes. En otras palabras, el consumo del sistema de aire central es muy alto, en relación al consumo de energía de otros equipos conectados a la red de un hogar. Por consiguiente, el mayor consumo de energía de las zonas residenciales en el estado de Massachusetts proviene de la calefacción. Esto también se puede apreciar en la gráfica 3, donde el 59% de la energía usada en promedio por hogar en Massachusetts corresponde al calentamiento de espacios (New England,1922).

Gráfica 3: Consumo de energía por uso final.



Fuente: (New England,1922)

2.5 COMPROMISOS AMBIENTALES DEL ESTADO DE MASSACHUSETTS

Estados Unidos ha fortalecido sus herramientas políticas para lograr la transición energética, la cual se ha convertido en un concepto de desarrollo y transformación de la estructura de fuentes y uso de energía de forma alternativa y sostenible. Cabe resaltar que algunas de las principales instituciones existentes en Massachusetts en relación con el uso eficiente de la energía y las emisiones de gases de efecto invernadero son: el Departamento de Protección Ambiental de Massachusetts (*DEP*, por sus siglas en inglés), el Consejo Americano para una Economía Eficiente en Energía (*ACEEE*, por su nombre en inglés), y el Departamento de Recursos Energéticos de Massachusetts (*DOER*).

En la actualidad Massachusetts ha sido clasificado por el Departamento de Recursos Energéticos de Massachusetts (Massachusetts Department of Energy Resources), como el estado número uno en eficiencia energética a nivel nacional durante ocho años consecutivos. Un ejemplo de ello ocurrió en el 2017, cuando Massachusetts logró reducir el consumo anual de electricidad en un 3,18% y de gas natural en un 1,2% (Morin et al., 2018). Esto sin duda demuestra las exigencias del mercado y de la sociedad en contraposición con nuevas tecnologías que permiten hacer una verdadera contribución al medio ambiente.

3. PROPUESTA Y POSIBILIDADES DE RECONVERSIÓN ENERGÉTICA

La propuesta inicial y de reconversión energética para con la empresa *NEI General Contracting*, es cambiar el sistema de climatización que tienen planeado instalar en los apartamentos del complejo residencial *The Grove Apartment*, por un sistema horizontal de bombas de calor geotérmico de circuito cerrado (*Closed loop geothermal systems*), que como su nombre lo indica, hacen uso del calor de la tierra a través de su extracción. Se plantea entonces la elección adecuada del equipo según las cargas térmicas del apartamento objeto de estudio, y se realiza un análisis de costos anuales para determinar el ahorro total que tendrían los propietarios, si se instalara el sistema optimizado frente a los convencionales. A parte, el proyecto tendría un valor agregado que le permitiría a la empresa incrementar el valor por ft², y, en consecuencia, aunque la inversión sea mayor no se verían afectadas las ganancias. Lo anterior se demuestra más adelante a través de un flujo de caja del cliente, indicando que aun cuando el valor del apartamento es mayor, la demanda puede aumentar; no solo por los ahorros anuales en gastos de recibos de energía y gas natural, sino también por los beneficios a los que pueden acceder los propietarios, gracias a que el estado de Massachusetts ofrece un crédito fiscal para las propiedades en las que se instalen este tipo de equipos.

3.1 SISTEMA HORIZONTAL DE BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICO DE CIRCUITO CERRADO

Las bombas de calor geotérmico utilizan el calor renovable de la tierra para producir calefacción o refrigeración. Esto ocurre por medio de un intercambiador de calor que permite condensar el calor y proporcionar el suficiente aire caliente al hogar en los climas más fríos (Karl Ochsner, 2012). Y en verano ocurre lo opuesto, de modo que se vierte el calor del hogar al suelo proporcionando refrigeración (Karl Ochsner, 2012). Dicho en otras palabras, es un sistema que consta de tres partes: un intercambiador de calor de tierra, una unidad de bomba de calor y un sistema de distribución de HVAC (PickHvac, 2020). Este último no es muy diferente al sistema de ductos de aluminio tradicionales. En resumidas cuentas, se eligió un sistema de tipo cerrado horizontal, puesto que son más comunes y los costos de instalación son más bajos, pero son ideales para zonas residenciales en las que se cuente con suficiente terreno, como lo es el presente caso (U.S Department of Energy, 2020).

Es fundamental aclarar que este tipo de sistemas requieren de un área adecuada para su instalación, lo que inicialmente se comprobó al conocer el terreno del proyecto (figura 1.). Guiado por expertos en el tema que aconsejaron conveniente su instalación en términos de espacio y ubicación.

3.2 CÁLCULO DE LAS CARGAS TÉRMICAS Y ELECCIÓN DEL EQUIPO

Para conocer y calcular las cargas térmicas de refrigeración y calefacción se utilizó el programa *Chvac-Commercial HVAC Loads*. Los datos de entrada fueron los relacionados a los muros exteriores, ventanas y techo (Tabla 1.). Dicho programa tiene en cuenta los materiales que se usan en la construcción de muros, por ello se tuvo en cuenta que los materiales a implementar por la empresa para los muros son: madera frondosa, fibra de vidrio tipo R-13, plástico de vinilo, y una capa de yeso. Otro factor importante para el cálculo de las cargas fue la ubicación cardinal de los muros exteriores del apartamento.

Adicional, fueron a criterio las condiciones de diseño interior y exterior, las cuales fueron elegidas a partir de la literatura. Según el libro *HVAC Fundamentals* la mayoría de sistemas de climatización están diseñados con una humedad relativa de diseño interior recomendada del 50% y una temperatura de bulbo seco de 75°F (Brumbaugh, 2004). Las temperaturas de diseño exterior para verano e invierno fueron de 91°F y de 6°F, en su respectivo orden.

Figura 1: Hoja de entrada para el cálculo de cargas.

Chvac - Full Commercial HVAC Loads Calculation Program				Elite Software Development, Inc.						
Elite Software Development College Station, TX 77845				Boston Houses Page 2						
General Project Data Input (cont'd)										
Building-Level Design Conditions										
Design Month	Outdoor Dry Bulb	Outdoor Wet Bulb	Indoor Rel.Hum	Indoor Dry Bulb	Grains Diff	In/Outdoor Correction				
August	91	73	50%	75	28,50					
Winter	6			75		-2				
Master Roofs										
Roof No.	ASHRAE Roof#	Roof U-Fac	Dark Color	Susp. Ceil						
1	7	0,038	Yes	Yes						
2	6	0,038	Yes	No						
Master Walls										
Wall No.	ASHRAE Group	Wall U-Fac	Wall Color							
1	E	0,046	D							
2	G	0,062	L							
3	G	0,032	L							
Master Partitions										
Partition No.	Partition U-Factor	Cool T-D	Heat T-D							
1	0,062	14	53							
Master Glass										
Glass No.	Summer U-Factor	Winter U-Factor	Glass Shd.Coef.	Interior Shading	Interior Shd.Coef					
1	0,380	0,470	0,400	2	0,000					
2	0,790	0,750	0,300	2	0,000					
3	0,360	0,430	0,400	1	0,340					
Master Shading Devices										
Shade No.	Dist Horiz Overh Projects	Dist Beyond Right W.Edge	Dist Beyond Left W.Edge	Dist Overh Above Wind	Dist Right Fin Proj	Dist R-Fin Beyond W.Edge	Ht Of Right Fin	Dist Left Fin Proj	Dist L-Fin Beyond W.Edge	Ht Of Left Fin
1	2,00	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2,00	1,00	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Autor

Es así como se digitaron los datos en la hoja de entrada del programa (figura 1.) y se obtuvieron los resultados finales (figura 2.). Entendiendo que las cargas térmicas son la cantidad térmica por unidad de tiempo que un recinto cerrado intercambia con el exterior y que su cálculo permite disponer los sistemas adecuados de calefacción y enfriamiento para compensarlo (Karl Ochsner, 2012). Para el presente caso el software arrojó una carga térmica de calefacción de 36095 Btuh y para refrigeración una carga de 2,29 toneladas que traducidos a Btuh son 27480.

Figura 2: Cargas totales.

Check Figures		
Total Building Supply Air (based on a 20° TD):	906	CFM
Total Building Vent. Air (8,27% of Supply):	75	CFM
Total Conditioned Air Space:	1.056	Sq.ft
Supply Air Per Unit Area:	0,8583	CFM/Sq.ft
Area Per Cooling Capacity:	461,1	Sq.ft/Ton
Cooling Capacity Per Area:	0,0022	Tons/Sq.ft
Heating Capacity Per Area:	34,18	Btuh/Sq.ft
Total Heating Required With Outside Air:	36.095	Btuh
Total Cooling Required With Outside Air:	2,29	Tons

Fuente: Autor

Conociendo dichos valores y el área a refrigerar se pueden calcular los pies cuadrados por tonelada que se necesitan (441 ft²/ton) de enfriamiento y los Btuh por cada pie cuadrado necesario en el sistema de calefacción (35,6 Btuh/ft²). (Tabla 4.)

Tabla 4: Cargas térmica por ft².

Enfriamiento		
Área casa	m ²	93,83
Área casa	ft ²	1.010
Carga enfriamiento	ton	2,29
ft2 por ton refrigeración	ft ² /ton	441
Calefacción		
Área casa	m ²	85
Área casa	ft ²	1.010
Carga calefacción	Btuh	36.095
Carga por ft2	Btuh / ft ²	35,6

Fuente: Autor

En conjunto con las cargas definidas y las fichas técnicas de los equipos se realizó una comparación de costos anuales de operación por enfriamiento y calefacción para el apartamento en estudio. Para seleccionar los equipos a comparar con los elegidos por la constructora a instalar, se tuvo en cuenta que la potencia fuese un poco mayor a 36095 Btuh y no menor a 27480 Btuh, con el objetivo de asegurar que cumpla con las cargas térmicas demandadas. Con referencia a ello, se escogió para el sistema optimizado una Bosch Heat Pump SM048, que posee dos fases de operación, una a carga total y otra a carga parcial. Durante el invierno será necesario utilizar el equipo a carga total, pero para verano no será necesario y se podrá operar a carga parcial. Esto se puede observar en la siguiente figura 3.

Figura 3: Especificaciones técnicas de una unidad Bosch Geothermal Heat Pumps.

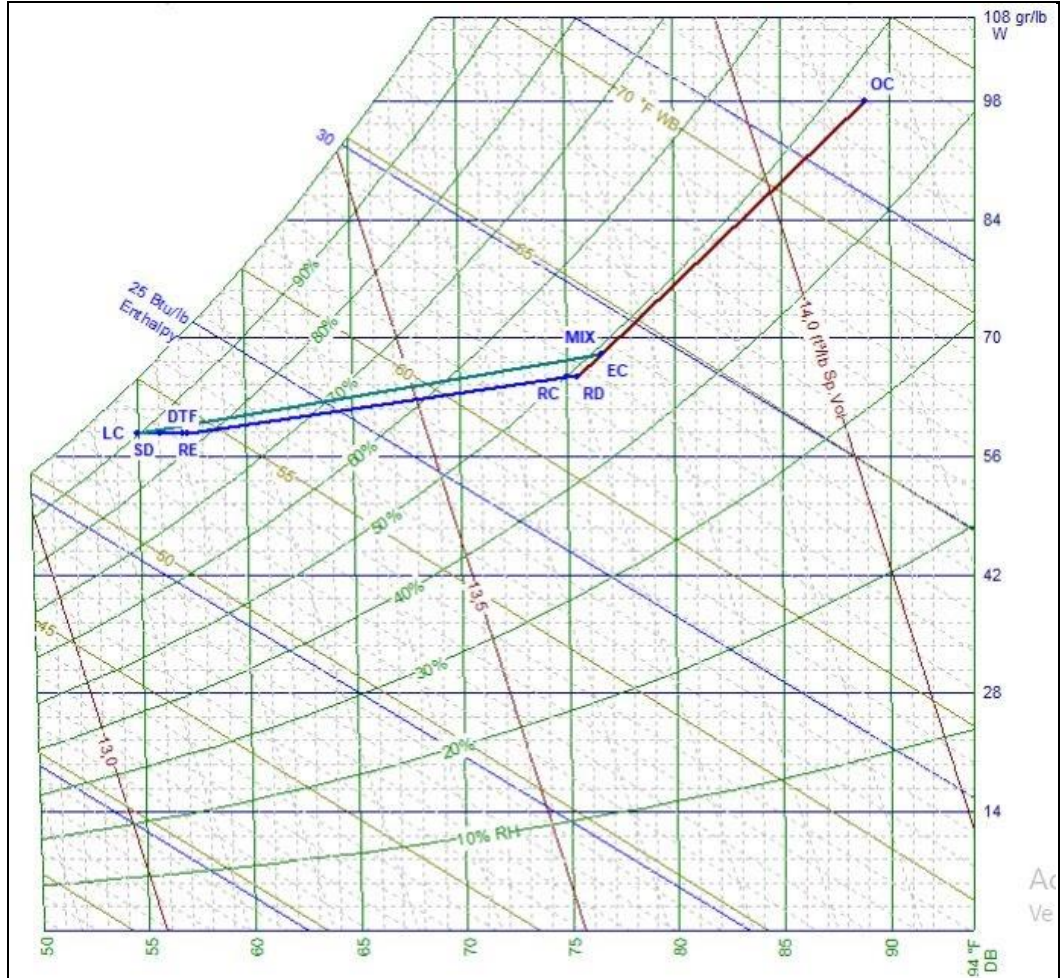
HZ Specifications ASHRAE/AHRI/ISO 13256-1. English (I-P) Units														
	Model	Water Loop Heat Pump				Ground Water Heat Pump				Ground Loop Heat Pump				Fluid Flow GPM
		Cooling 86°F		Heating 68°F		Cooling 59°F		Heating 50°F		Cooling 77°F		Heating 32°F		
		Capacity Btuh	EER Btuh/W	Capacity Btuh	COP	Capacity Btuh	EER Btuh/W	Capacity Btuh	COP	Capacity Btuh	EER Btuh/W	Capacity Btuh	COP	
FULL LOAD	SM024	25500	17.4	29200	5.6	29000	26.5	23500	4.9	26600	19.9	18000	4.1	6
	SM036	39000	19.0	42800	5.6	43300	28.0	35900	5.1	40800	22.0	28400	4.3	9
	SM048	49200	16.6	56100	5.3	55300	25.3	46300	4.7	51300	19.3	36900	4.0	12
	SM060	63800	17.0	73300	5.2	70200	24.4	60300	4.6	65100	18.9	48000	3.9	15
	SM070	71600	16.3	84000	5.1	78700	23.1	70000	4.5	73700	18.5	55300	3.8	18
PART LOAD	SM024	18500	18.9	21200	6.5	21700	33.6	16700	5.1	21000	28.1	14400	4.4	6
	SM036	29000	22.2	31000	6.5	32600	37.0	25200	5.2	31900	32.0	22400	4.7	9
	SM048	36700	18.9	40900	6.2	42000	33.8	33700	5.2	39900	27.8	29800	4.5	12
	SM060	47500	18.7	53600	5.8	53300	31.2	44300	4.8	51600	26.5	39800	4.4	15
	SM070	55200	17.8	64900	5.7	60800	28.5	52900	4.8	60300	25.4	46900	4.3	18

Fuente: (Bosch, 2017)

3.3 GRÁFICA PSICOMÉTRICA PARA EL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN DEL APARTAMENTO

En términos específicos el sistema de climatización debe ser capaz de suministrar suficiente aire fresco del exterior para mantener los estándares de pureza y comodidad del aire. De acuerdo con la ASHRAE-Standard 62,1-2019 es necesario que exista un caudal mínimo de aire exterior dentro del sistema. El caudal de aire exterior calculado por el programa fue de 75 CFM (ft³/min), en conjunto con un caudal del sistema de 906 CFM, garantizando así la remoción de la carga térmica. Como se puede observar en la gráfica 4, en la fase de retorno del aire a la máquina, el aire se mezcla con el aire exterior (Mix) y vuelve a pasar por el serpentín de la unidad.

Gráfica 4: psicrométrica de climatización para el apartamento en estudio.



Fuente: Autor

3.4 COSTOS ANUALES DE OPERACIÓN

Se plantea entonces en Excel una tabla de costos anuales (Tabla 5,6.). Para los equipos de enfriamiento se utilizó el EER (*Factor de eficiencia energética estacional*) de cada unidad y se hallaron los kW/ton, que, multiplicado por la carga de refrigeración, permite conocer el consumo en kW, para luego multiplicarlo por el precio actual del kWh en Massachusetts y así finalmente calcular el costo anual de operación, suponiendo que el equipo trabaje un 30% del año. El resultado final es un costo anual de operación de \$1.360 dólares al implementar una condensadora

Amana ASX130181D y un costo de operación de US\$538 usando una Bosch Heat Pump SM048. Otra ventaja es que las bombas de calor geotérmico que ofrece Bosch, no solo son de alta eficiencia, sino que aparte están calificadas por ENERGY STAR y son elegibles para un crédito fiscal del 22% para los sistemas puestos en servicio después del 31/12/2020 y antes del 01/01/2022.

Tabla 5: Costos anuales por enfriamiento.

Enfriamiento				
	Hydro tech R-410A	Amana ASX130181D	Bosch Heat Pump SM048	VRF Daikin
EER	13	11	27,8	21,3
kW /ton (12/EER)	0,92	1,09	0,43	0,56
Carga térmica (ton)	2,29	2,29	2,29	2,29
Consumo (kW)	2,11	2,50	0,99	1,29
US\$/kWh	0,21	0,21	0,21	0,21
horas de uso	2.592	2.592	2.592	2.592
Costo anual (US)	\$ 1.151	\$ 1.360	\$ 538	\$ 702

Fuente: Autor

Notablemente el ahorro al implementar una Bosch Heat Pump SM048 es del 60% en refrigeración. Ahora bien, este equipo sigue representando ahorros, en contraste con el horno Rheem Classic (Tabla 6.). Los costos por calentar el aire utilizando gas natural son de US\$2.114,05 anuales, pero haciendo uso de energía renovable (calor), la Bosch Heat Pump SM048 tiene un costo de operación anual de US\$1.439,16. Lo que, en resumidas cuentas, representa un ahorro total al año por climatización de US\$1.977,21. No cabe duda que este número resulta ser un gran incentivo para los futuros compradores de apartamentos del complejo.

Tabla 6: Costos anuales por calefacción.

Calefacción				
	Hydro tech R-410A	Rheem Classic RGLQ05	Bosch Heat Pump SM048	VRV Daikin
AFUE	N.A.	0,8	N.A.	N.A.
COP	4,3	N.A.	4,0	4,3
Carga Btu/h	36.095	36.095	36.095	36.095
Carga kW	10,58	10,58	10,58	10,58
Consumo kW (kW/COP)	2,46	0,373	2,64	2,46

US\$/kWh	0,21	0,21	0,21	0,21
Horas de uso	2.592	2.592	2.592	2.592
Gas natural Btu/ft3	N.A.	1.075	N.A.	N.A.
Consumo gas natural ft3/Año	N.A.	121.643,16	N.A.	N.A.
US\$ /ft3 gas	N.A.	0,02	N.A.	N.A.
Costo anual (US)	\$1.338,75	\$2.114,05	\$1.439,16	\$1.338,75
Costo total Energía del sistema (US)	\$2.489,36	\$3.473,86	\$1.977,21	\$2.041,00

Fuente: Autor

Con el fin de realizar un análisis más a fondo, también se tuvieron en cuenta otros equipos diferentes al propuesto, y pese a que no utilizan gas natural como fuente de energía siguen teniendo altos consumos de electricidad (kW). Por esta razón, se descartaron como posibilidades. Agregando que, aun así, siguen siendo menos costosa su operación que la de un sistema de aire central. Los equipos analizados y descartados fueron: una Hydro tech R-410A, la cual es una bomba de calor de fuente de agua (un lago), que utiliza refrigerante R-410A; y un sistema de VRV Daikin de aire de tipo multi-split, cuyo uso es más frecuente en edificios comerciales.

3.5 BENEFICIOS

En temas ambientales, el sector de la construcción juega un papel fundamental mediante la edificación de edificios verdes, que aporte a la reducción de la huella de carbono y así mismo se cumpla con los objetivos de desarrollo sostenible (Meyer & Pachauri, 2014).

En segundo lugar y en términos de contribuciones sociales más importantes que puede realizar la constructora al replantear sus objetivos hacia viviendas sostenibles (en términos de eficiencia energética), son incentivar y apoyar la economía doméstica, gracias a que el uso de la energía renovable, calor en este caso, genera importantes ahorros anuales de operación por climatización (Dodge Data & Analytics, 2018). Sin mencionar el aporte a la salud y bienestar de las personas a causa de una mejora en la calidad del aire en interiores, permitiendo reducir las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y aumentar la expectativa de vida, al igual que el bienestar y calidad de vida (Edenhofer et al., 2011).

El siguiente punto a tratar son los beneficios económicos, para ellos es necesario tener en cuenta la inversión que debe realizar la empresa (*NEI General Contracting*) por la instalación de una bomba de calor geotérmico. Por medio de cotizaciones a empresas de *HVAC* que realizan este tipo de instalaciones, se logró desglosar el

costo total de instalación (Tabla 7). Si se conoce que el valor total de instalación de un equipo geotérmico es de US\$16.675, ese debe ser el valor que se le debe aumentar al costo de construcción de la unidad.

Tabla 7: Costo total de instalación de un sistema de bombas de calor geotérmico.

Tipo de sistema	Bombas de calor geotérmico
Referencia	Bosch Heat Pump SM048
Costo del equipo US\$	\$3.900
Costo de instalación US\$	\$2.025
Costo de mano de obra y equipo de instalación US\$	\$10.750
Costo Total US\$	\$16.675

Fuente: Autor

En segundo lugar, sabiendo de antemano el costo de construcción de la unidad en el caso tradicional (US\$281.250) y el precio de venta (US\$386.718,75), se sobreentiende que el rango de ganancia que manejan es del 37,5%. Ahora, visto desde el caso optimizado, se añade el costo de instalación del equipo al costo tradicional y tomando en cuenta el mismo porcentaje de ganancia se obtiene que el nuevo precio de venta será de US\$409.646,88.

A pesar de que la inversión inicial por parte de la empresa (*NEI General Contracting*), será mayor, su utilidad aumentaría de US\$104,42 por ft² a US\$110,62. (Tabla 8.)

Tabla 8: Precio de venta del departamento para el caso tradicional y optimizado

Caso Base	Tradicional	Optimizado
Precio de venta (US)/ft²	\$382,89	\$405,59
Costo de construcción (US)/ft²	\$278,47	\$294,98
Utilidad (US)	\$104,42	\$110,62
Costo de construcción de la unidad (US)	\$281.250,00	\$297.925,00
Precio de venta de la unidad (US)	\$386.718,75	\$409.646,88

. Fuente: Autor

Por último, la forma en que se puede demostrar cómo el cliente seguirá interesado aun con el aumento del precio, es por medio de un flujo de caja (Tabla 9.). Dentro de esta parte entra en juego el ahorro anual por cambio de tecnologías (US\$1.496,65).

No sobra mencionar que el periodo de 30 años elegido, se debe a que en los Estados Unidos la mayoría de créditos para vivienda son tomados o diferidos en ese tiempo. En el caso de la tasa de descuento se tomó el Beta del sector de la construcción (1,36) multiplicado por un rendimiento del 1% para el bono del Tesoro a 10 años [19], lo que resultó en una tasa de descuento del 1,36%. Dicho esto, se calculó el VPN (Tabla 9.), el cual dio un valor positivo, permitiendo afirmar que para una tasa de descuento de 1,36% el negocio es viable para el cliente.

Tabla 9: Flujo de caja del cliente.

FLUJO DEL CLIENTE					
Inversión Mayor (US)	\$409.646,88				
Ahorro Anual (US)	\$1.496,65				
Tasa de descuento	1,36%				
Inversión (US)	-\$409.646,88				
Año 1	\$1.496,65	Año 11	\$1.496,65	Año 21	\$1.496,65
Año 2	\$1.496,65	Año 12	\$1.496,65	Año 22	\$1.496,65
Año 3	\$1.496,65	Año 13	\$1.496,65	Año 23	\$1.496,65
Año 4	\$1.496,65	Año 14	\$1.496,65	Año 24	\$1.496,65
Año 5	\$1.496,65	Año 15	\$1.496,65	Año 25	\$1.496,65
Año 6	\$1.496,65	Año 16	\$1.496,65	Año 26	\$1.496,65
Año 7	\$1.496,65	Año 17	\$1.496,65	Año 27	\$1.496,65
Año 8	\$1.496,65	Año 18	\$1.496,65	Año 28	\$1.496,65
Año 9	\$1.496,65	Año 19	\$1.496,65	Año 29	\$1.496,65
Año 10	\$1.496,65	Año 20	\$1.496,65	Año 30	\$1.496,65
VPN (US)	\$36.666,85				

Fuente: Autor

Finalmente, otro factor a considerar como beneficio es el crédito fiscal ofrecido por el estado de Massachusetts (ClimaMaster, 2009). Conforme con los requisitos expuestos en la figura 4, el equipo propuesto para el apartamento califica para dicho beneficio, puesto que la eficiencia para refrigerar (EER) es de 27,8 y para calefacción el COP es 4,0. En otros términos el crédito fiscal le permite al propietario reclamar el 22% sobre la cantidad que gastaron en la compra e instalación de un sistema de bomba de calor geotérmica de sus impuestos federales sobre la renta.

Figura 4: Requisitos de crédito fiscal para geotermia.

26% de los requisitos de crédito fiscal federal para geotermia *				
#	Bucle cerrado	Lazo abierto	Expansión directa:	Subvenciones para geotermia de Maryland:
1	EER ≥ 14,1	EER ≥ 16,2	EER ≥ 15,0	EER ≥ 15,5
2	COP ≥ 3,3	COP ≥ 3,6	COP ≥ 3,5	COP ≥ 3,5

Fuente: (Schultz, 2020)

Indudablemente resulta beneficioso económicamente hablando para la empresa y para el cliente. Al mismo tiempo que se aporta a reducir la huella de carbono y las personas se benefician de una mejor calidad del aire en interiores.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es claro que existe un gran potencial de mejora del sistema de climatización inicialmente planificado por la empresa, el cual se identificó a través de la comparación entre el apartamento escogido para este estudio y una casa modelo con la que se estimaron los consumos energéticos de un sistema de tipo aire central. Así pues, se rectificó que el uso energético de una casa con un sistema convencional es elevado, con consumos máximos promedio de 10,02 MMBTU/Mes durante invierno, a causa de la demanda por calefacción. Dado esto es necesario realizar un cambio tecnológico y evitar el uso innecesario de energía eléctrica y gas natural.

Se realizó la estimación de consumo energético de 4 diferentes equipos para climatización (enfriamiento y calefacción), sin embargo, se descartaron como opción las bombas de calor de fuente de agua, y un equipo de VRV Daikin de aire tipo multi-split, visto que, aun cuando no consumen gas natural como lo es el caso del horno Rheem Classic RGLQ05, siguen representando alta demanda de energía. Por tanto, se eligió que el mejor sistema para implementar, es una bomba de calor geotérmico.

Respecto a los beneficios económicos evaluados, la propuesta de implementar bombas de calor geotérmico (Bosch Heat Pump SM048) en el apartamento, en vez de un sistema de aire central compuesto por una Amana ASX130181D y un horno Rheem Classic RGLQ05, resulta factible. Esto se representa en un ahorro anual de US\$1.496,65 por costos de operación para los futuros propietarios, agregando un aumento en el valor de venta de la propiedad de US\$22.928,13 dólares, que beneficia la utilidad de la empresa un \$6,19 dólares por ft² y que a su vez mantiene el interés del cliente por los ahorros ya explicados. Y que traducidos en un flujo de caja arroja un VPN positivo que indica que para una tasa de descuento de 1,36% el negocio es viable para el cliente.

Se recomienda implementar un sistema de bombas geotérmicas (Bosch Heat Pump SM048), como el propuesto en este documento para con cada uno de los apartamentos en vez de un sistema tradicional de aire central. Teniendo en cuenta que con la guía de expertos en el tema se comprobó que resultaría conveniente su instalación en términos de espacio y ubicación. Que, aunque representa una mayor inversión inicial como ya se ha visto, permite elevar el precio de la unidad, sin perder el interés del cliente y recuperar la inversión al elevar el precio de las unidades. Sin embargo, existe una oportunidad de mejora muy importante con relación a la accesibilidad de información relacionada a las cotizaciones de instalación de este tipo de tecnologías.

Por último, este trabajo puede ser utilizado como guía para proyectos o empresas del sector de construcción, que buscan mejorar su imagen, contribuir al medio

ambiente, y generar mejores utilidades, asociadas a la instalación de equipos de climatización.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Bosch. (2017, Mar 1). Heat pump system | bosch. *Professional Builder* (1993), Recuperado de <https://search.proquest.com/docview/1882856329>
- Brumbaugh, J. E. (2004). *Audel HVAC fundamentals, volume 3: Air conditioning, heat pumps and distribution systems*. Hoboken, UNITED STATES: John Wiley & Sons, Incorporated. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecausta-ebooks/detail.action?docID=219096>
- ClimaMaster. (2009, Jan 1). Guide to federal tax incentives for residential geothermal heat pumps. *Environmental Design + Construction*, 12, 28. Recuperado de <https://search.proquest.com/docview/235041996>
- Diebel, J., Norda, J. & Kretchmer, O. Average weather in Boston. (2020). Recuperado de <https://weatherspark.com/y/26197/Average-Weather-in-Boston-Massachusetts-United-States-Year-Round>
- Dodge Data & Analytics. (2018). *World green building trends 2018*. Recuperado de <https://www.construction.com/company/about>
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Kadner, S., Zwickel, T., von Stechow, C. (2011). *Renewable energy sources and climate change mitigation*. New York: Cambridge University Press. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781139151153>
- Energy Star. (2005). *A guide to energy-efficient heating and cooling*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation.

Energy Star. (2020). Utility bills (home energy yardstick). Recuperado de <https://www.energystar.gov/campaign/homeAdvisor>

Furnaces and boilers. (2020). Recuperado de <https://www.energy.gov/energysaver/home-heating-systems/furnaces-and-boilers>

Global Sea Temperatures. (2020). Boston sea temperature | december average | united states | sea temperatures. Recuperado de <http://www.seatemperature.org/north-america/united-states/boston-december.htm>

Karl Ochsner. (2012). *Geothermal heat pumps* Taylor and Francis. doi:10.4324/9781849771443 Recuperado de <https://www.taylorfrancis.com/books/9781136564970>

Marketwatch. (2020). TMUBMUSD10Y | U.S. 10 year treasury note overview. Recuperado de <https://www.marketwatch.com/investing/bond/tmubmUSD10y?countrycode=bx>

Meyer, L., & Pachauri, R. (2014). *Cambio climático 2014*. Luxembourg: Publications Office. Recuperado de <http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:ML0514112:ES:HTML>

Morin, J., Lauwers, W., McCarey, M., & Judge, M. (2018). *Massachusetts comprehensive energy plan*. Recuperado de <https://www.mass.gov/doc/massachusetts-comprehensive-energy-plan-0/download>

New england. (1922, Sep 16,). *Boston Daily Globe (1872-1922)* Recuperado de <https://search.proquest.com/docview/491844524>

Ortiz, N. (2020). *Dimensionamiento sistema solar*. Bogotá.

- PickHvac. (2020). What is the most efficient heating system in 2020. Recuperado de <https://www.pickhvac.com/most-efficient-heating-system/>
- Schultz, M. (2020). 26% federal geothermal tax credit • earth river geothermal, Inc. Recuperado de <https://earthrivergeothermal.com/26-percent-federal-geothermal-tax-credit/>
- U.S Department of Energy. (2020). Geothermal heat pumps. Recuperado de <https://www.energy.gov/energysaver/heat-and-cool/heat-pump-systems/geothermal-heat-pumps>
- U.S. EPA. (2009). *Buildings and their impact on the environment: A statistical summary*. Recuperado de <https://archive.epa.gov/greenbuilding/web/html/whybuild.html>
- Yamashita, Y., & Ishida, H. (2000). Japan's short-term energy outlook