



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Refrigeración con bomba de
calor geotérmica, análisis y
comportamiento en caso
práctico**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Juan Pablo Borrego Mata

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Eduardo Pérez González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

En agradecimiento a mi familia, a mi madre María del Carmen Mata, a mi padre Rafael Borrego y mis hermanas Natalia Borrego y Montserrat Borrego por el apoyo y la oportunidad que me dieron para realizar una carrera universitaria. A las personas que conocí en esta etapa y me estuvieron acompañando, especialmente Alejandra Franco, Ruth Moreno, Blanca María Itzel, Francisco Alfaro y Baruc González.

Finalmente, al Dr. Eduardo Pérez, Instituto de Ingeniería y grupo IIDEA por la ayuda que brindaron para la realización de este trabajo.

Tabla de contenido

Tabla de contenido.....	i
Tabla de Ilustraciones	ii
Lista de tablas	iii
Objetivo general	iv
Objetivos particulares.....	iv
Resumen.....	v
1 Climatización de espacios con energía geotérmica	1
1.1 ¿Qué es la geotermia?.....	1
1.2 Contexto mundial de las bombas de calor	3
1.3 Conceptos y principios fundamentales de las bombas de calor geotérmica	7
1.3.1 Bombas de calor en México.....	11
2 Propuesta de refrigeración geotérmica.....	12
2.1 Ubicación geográfica.....	12
2.2 Dimensiones y estructura del recinto	13
2.2.1 Pared Norte.....	15
2.2.2 Pared Este	15
2.2.3 Pared Oeste.....	16
2.2.4 Pared Sur.....	16
2.2.5 Techo.....	17
2.3 Ocupación del recinto	17
2.4 Cálculos de cargas térmicas para refrigeración	17
2.4.1 Consideraciones de temperatura	18
2.4.2 Cálculos de cargas sensibles para refrigeración.....	18
2.4.2.1 Cargas por transmisión de cerramientos opacos y traslucidos.	19
2.4.2.2 Cargas térmicas por radiación solar	20
2.4.2.3 Cargas sensibles por ventilación o infiltración de aire	22
2.4.2.4 Cargas sensibles por ocupación local	24
2.4.2.5 Cargas sensibles por iluminación	25
2.4.2.6 Cargas sensibles por máquinas.....	26
2.4.3 Cargas latentes para refrigeración.....	26
2.4.3.1 Cargas latentes por ocupación local.....	26
2.4.3.2 Cargas latentes por infiltración de aire	26
2.5 Resultados de cálculos	27

3	Metodología.....	30
3.1	Requerimientos técnicos.....	32
3.2	Características operativas de la bomba de calor geotérmica.....	38
3.3	Sistema de distribución de aire.....	39
3.4	Instrumentación y recolección de datos.....	43
3.4.1	Sistema de distribución de aire.....	44
3.4.2	Bomba de calor geotérmica (BCG).....	45
3.4.3	Circuito del agua (simulador de GHE).....	45
4	Resultados de pruebas.....	47
4.1	Análisis de resultados.....	52
4.1.1	Análisis del cuarto refrigerado.....	52
4.1.2	Análisis de bomba de calor.....	55
4.1.3	Análisis de GHE.....	57
5	Conclusiones generales.....	58
6	Bibliografía.....	60

Tabla de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1. DIAGRAMA DE LINDAL, MUESTRA DIVERSAS APLICACIONES DE LA GEOTERMIA EN DISTINTOS SECTORES Y A DIFERENTES TEMPERATURA DE SUELO. (OVACEN, 2023).....	3
ILUSTRACIÓN 2. CAMBIOS PROYECTADOS DE LA TEMPERATURA MÁXIMA DIARIA ANUAL, LA HUMEDAD TOTAL MEDIDA ANUAL DE LA COLUMNA DEL SUELO Y LA PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL DE UN DÍA A NIVEL DE CALENTAMIENTO GLOBAL DE 1.5°C, 2°C, 3°C Y 4°C EN RELACIÓN CON 1850-1900. (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2023).....	5
ILUSTRACIÓN 3. UTILIZACIÓN DIRECTA O INDIRECTA DE ENERGÍA GEOTÉRMICA PARA DIVERSOS FINES (LUND & TOTH, 2020).	6
ILUSTRACIÓN 4. ESQUEMA BÁSICO DE CICLO DE REFRIGERACIÓN DE BOMBA DE CALOR DE COMPRESIÓN Y DIAGRAMA TEMPERATURA VS ENTROPÍA DEL CICLO.....	7
ILUSTRACIÓN 5. OPERACIÓN DE BOMBA DE CALOR EN INVIERNO Y VERANO. (GRASSI, 2018).....	8
ILUSTRACIÓN 6. TIPOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR GEOTÉRMICOS (WU, 2009). .	10
ILUSTRACIÓN 7. IMAGEN SATELITAL DEL EDIFICIO 5 DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM (GOOGLE , 2023).	13
ILUSTRACIÓN 8. DIMENSIONES Y SIMPLIFICACIÓN DIGITAL DEL RECINTO A REFRIGERAR (SKETCH UP).....	14
ILUSTRACIÓN 9. DIMENSIONES Y MATERIALES DE PARED NORTE (SKETCH UP)	15
ILUSTRACIÓN 10. DIMENSIONES Y MATERIALES DE PARED ESTE (SKETCH UP)	15
ILUSTRACIÓN 11. DIMENSIONES Y MATERIALES DE PARED OESTE (SKETCH UP).....	16
ILUSTRACIÓN 12. DIMENSIONES Y MATERIALES DE PARED SUR (SKETCH UP)	16
ILUSTRACIÓN 13. DIMENSIONES Y MATERIALES DE TECHO (SKETCH UP).....	17
ILUSTRACIÓN 14. SECCIÓN DE OFICINA ANTES DE MEJORAS DE AISLAMIENTO TÉRMICO	31
ILUSTRACIÓN 15. SECCIÓN DE LABORATORIO DE CERVEZA ARTESANAL ANTES DE MEJORAS DE AISLAMIENTO TÉRMICO	32

ILUSTRACIÓN 16. ESQUEMA DE AISLAMIENTO DE VENTANAS.	33
ILUSTRACIÓN 17. ESQUEMA DE AISLAMIENTO DE PARED OPACA ESTE.	34
ILUSTRACIÓN 18. AISLAMIENTO CON PLÁSTICO BURBUJA Y PLACAS DE POLIESTIRENO	34
ILUSTRACIÓN 19. PLANO ESTRUCTURA DE LÁMINA GALVANIZADA	35
ILUSTRACIÓN 20. CAD DE ESTRUCTURA FINAL DE LÁMINA GALVANIZADA Y FIBRA AISLANTE.....	36
ILUSTRACIÓN 21. PROCESO DE MANUFACTURA Y ARMADO FINAL DE ESTRUCTURA DE LÁMINA CON AISLANTE.	37
ILUSTRACIÓN 22. INSTALACIÓN FINAL DE ESTRUCTURAS AISLANTES DE PAREDES NORTE Y SUR	38
ILUSTRACIÓN 23. DEPÓSITO DE AGUA PARA SIMULAR EL INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO	39
ILUSTRACIÓN 24. RESULTADO DE DIMENSIONES DE DUCTO NECESITADO SECCIÓN 1, DUCTULADOR COMERCIAL.	41
ILUSTRACIÓN 25. RESULTADO DE DIMENSIONES DE DUCTO NECESITADO EN SECCIÓN 2, DUCTULADOR COMERCIAL.	42
ILUSTRACIÓN 26. CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES DE DUCTO G FLEX DE GLASSFIBER. (GLASSFIBER, 2023).....	42
ILUSTRACIÓN 27. INSTALACIÓN DE DUCTOS.....	43
ILUSTRACIÓN 28. DISTRIBUCIÓN DE SENSORES POR PRUEBA PARA MAPEO TÉRMICO...	44
ILUSTRACIÓN 29. SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD HOBO MX2301.....	45
ILUSTRACIÓN 30. SIMATIC S7-1200 (WICONEX, 2023).....	45
ILUSTRACIÓN 31. DIAGRAMA DE SENSOR DE PRESIÓN (DORIA, 2023)	46
ILUSTRACIÓN 32. SENSOR RTD (MALOY, 2020)	46
ILUSTRACIÓN 33. SENSOR DE FLUJO YF-B6 (DIRENC.NET, 2023).....	46
ILUSTRACIÓN 34. TRANSMISORES DE CORRIENTE MFO-30.....	47
ILUSTRACIÓN 35. COMPORTAMIENTO DE TEMPERATURA A 50 CM DEL PISO.	48
ILUSTRACIÓN 36. COMPORTAMIENTO DE TEMPERATURA A 100 CM DEL PISO.	48
ILUSTRACIÓN 37. COMPORTAMIENTO DE TEMPERATURA A 196 CM DEL PISO.	49
ILUSTRACIÓN 38. COMPORTAMIENTO DE TEMPERATURA A 294 CM DEL PISO.	49
ILUSTRACIÓN 39. COMPORTAMIENTO DE LAS PRESIONES EN BCG.	50
ILUSTRACIÓN 40. CONSUMO ENERGÉTICO DE BCG.....	51
ILUSTRACIÓN 41. TEMPERATURAS DE ENTRADA Y SALIDA DEL AGUA DEL SISTEMA GHE.	52
ILUSTRACIÓN 42. CARACTERÍSTICAS DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE CON DIFUSOR DE DESCARGA HORIZONTAL. (KRUEGER, 2024).....	53
ILUSTRACIÓN 43. CARACTERÍSTICAS DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE CON DIFUSOR DE DESCARGA VERTICAL (KRUEGER, 2024).....	54
ILUSTRACIÓN 44. PATRÓN DE VELOCIDAD Y DE TEMPERATURA EN SIMULACIÓN DE CASETA DE 4 VÍAS Y DISTRIBUIDOR DE AIRE TRADICIONAL DE PARED DE AC. (BAMODU, XIA, & TANG, 2017).....	54
ILUSTRACIÓN 45. COMPARACIÓN DE VARIACIÓN DE TEMPERATURA EN GHE Y PRESIONES DE BCG.	55
ILUSTRACIÓN 46. COMPARACIÓN ENTRE COMPORTAMIENTO DE TEMPERATURA EN GHE Y CONSUMO ENERGÉTICO.....	58

Lista de tablas

TABLA 1. CONSUMO PROMEDIO ANUAL POR CONFORT POR TARIFA DE SECTOR DOMÉSTICO. (CONUEE, 2017)	11
TABLA 2. NORMALES CLIMATOLÓGICAS PARA EL CÁLCULO DE AIRE ACONDICIONADO EN POBLACIONES DE LA REPÚBLICA MEXICANA (INSTITUTO NACIONAL DE LA INFRESTRUCTURA FÍSICA EDUCATIVA, 2022)	18
TABLA 3. TEMPERATURAS CALCULADAS PARA ANÁLISIS DE CARGAS TÉRMICAS.	18

TABLA 4. FACTORES DE CORRECCIÓN PARA DIFERENTES TIPOS DE DISPOSITIVOS PROTECTORES CONTRA LA LUZ (HERNÁNDEZ GORIBAR, 2017)	21
TABLA 5. GANANCIA DE CALOR SOLAR A TRAVÉS DE CRISTALES PARA UNA LATITUD DE 20° (HERNÁNDEZ GORIBAR, 2017)	22
TABLA 6. INFILTRACIÓN EN VERANO, DEBIDO A LAS APERTURAS DE PUERTAS PARA LOCALES COMERCIALES (HERNÁNDEZ GORIBAR, 2017).	23
TABLA 7. AIRE EXTERIOR PARA VENTILACIÓN (INSTITUTO NACIONAL DE LA INFRESTRUCTURA FÍSICA EDUCATIVA, 2022)	24
TABLA 8. CALOR PRODUCIDO POR LAS PERSONAS, KCAL/H. (INSTITUTO NACIONAL DE LA INFRESTRUCTURA FÍSICA EDUCATIVA, 2022)	25
TABLA 9. RESULTADOS DE CARGAS TÉRMICAS POR CERRAMIENTOS OPACOS.	27
TABLA 10. RESULTADOS DE CARGAS TÉRMICAS POR CERRAMIENTOS TRASLUCIDOS.	28
TABLA 11. RESULTADO DE CARGAS TÉRMICAS POR RADIACIÓN SOLAR.	28
TABLA 12. RESULTADOS DE CARGAS TÉRMICAS SENSIBLES POR INFILTRACIÓN Y VENTILACIÓN.	28
TABLA 13. RESULTADOS DE CARGAS SENSIBLES POR OCUPACIÓN DEL LOCAL.	29
TABLA 14. RESULTADOS DE CARGA TÉRMICA POR ILUMINACIÓN.	29
TABLA 15. RESULTADOS DE CARGAS TÉRMICAS POR EQUIPOS.	29
TABLA 16. RESULTADOS DE CARGAS LATENTES POR OCUPACIÓN DEL LOCAL.	29
TABLA 17. RESULTADOS DE CARGAS TÉRMICAS LATENTES POR VENTILACIÓN O INFILTRACIÓN DE AIRE EXTERIOR.	29
TABLA 18. RESULTADO FINAL DE LA SUMATORIA TOTAL DE CARGAS TÉRMICAS.	30
TABLA 19. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA BCG	38
TABLA 20. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN EMPELADOS DURANTE LAS PRUEBAS.	46
TABLA 21. PROMEDIO DE LAS PRESIONES DE TRABAJO DE LA BCG EVALUADA.	55
TABLA 22. TABLA DE PARÁMETROS DE TRABAJO OBTENIDAS DE PROVEEDOR Y DURANTE PRUEBAS RESPECTIVAMENTE.	56
TABLA 23. DATOS SELECCIONADOS PARA ANÁLISIS ENERGÉTICO DE BCG	56

Objetivo general

Evaluación de la tecnología de bomba de calor geotérmica (BCG) para climatización de espacios y mediante la obtención de datos con sensores, analizar el funcionamiento del equipo al acondicionar dos cubículos del laboratorio de geotermia del Instituto de Ingeniería, UNAM: uno usado como oficina y otro dedicado a la producción de cerveza artesanal. Realizar el análisis de cargas térmicas, así como la instalación necesaria para refrigerar un recinto ocupado para producción artesanal de cerveza y otro como oficina.

Objetivos particulares

1. Investigar y comprender los principios y conceptos fundamentales de las bombas de calor geotérmicas.
2. Realizar una evaluación detallada del entorno, incluyendo la ubicación geográfica y la demanda de refrigeración del recinto.
3. Investigación de caso de estudios similares para validación de resultados obtenidos.
4. Identificar posibles áreas de mejora en la operación y diseño de la bomba de calor geotérmica, con el objetivo de optimizar su eficiencia y rendimiento.

Resumen

Las bombas de calor geotérmicas son una tecnología que ha tenido mucho crecimiento en los últimos años. Estos equipos podrían ayudar con el problema energético que actualmente existe en climatización residencial. Este trabajo se enfoca en el análisis de una bomba de calor aplicada a un caso práctico, y su objetivo es dar una mayor difusión a estos equipos en México y América Latina, donde recientemente se han estado tratando de implementar, y más ahora por la ola de calor que enfrenta la región, la cual se asocia con los efectos del calentamiento global.

El desarrollo de este trabajo se divide en 5 capítulos.

En el primer capítulo, se define en términos generales qué es una bomba de calor y cuál es su funcionamiento. Más adelante se mencionan ejemplos de su uso a nivel mundial, así como en casos regionales específicos.

En el segundo capítulo se presenta la propuesta de espacio controlado para el desarrollo de pruebas. Se describe el proceso y los cálculos para acondicionar dicho espacio. Esta etapa es importante para cualquier trabajo de climatización de espacios ya que de este depende la capacidad y eficiencia que tenga el sistema.

En el siguiente capítulo se plantea la metodología utilizada para el análisis del sistema sobre el espacio por acondicionar, en el cual, se describe desde la adecuación del espacio para la correcta climatización del cuarto tomando en cuenta los requerimientos técnicos, características operativas de la bomba de calor y el sistema de distribución de aire, así como la instrumentación y recolección de datos. Para mayor facilidad en el manejo de datos, se dividió en tres secciones 1) sistema de distribución de aire, 2) bomba de calor geotérmica y

3) circuito de agua. Se describen los sensores empleados en cada sistema, así como la forma y disposición de estos.

Finalmente, en los últimos capítulos, 4 y 5 se presenta el análisis de resultados y las conclusiones asociadas con estos. Los resultados más significativos son el análisis de comportamiento de la bomba de calor geotérmica al variar diferentes parámetros, por ejemplo la temperatura de entrada y el flujo del agua en el GHE, esto muestra la importancia del cálculo y la correcta instalación del intercambiador geotérmico para que esta tecnología realmente sea eficiente energéticamente, ayudando en la disminución del consumo energético y promoviendo el ahorro de energía. Finalmente, si bien no se logró realizar una simulación del comportamiento del aire, se pudo intuir dado diferentes artículos que muestran el comportamiento del aire dadas condiciones similares a las presentes en este trabajo.

Cabe mencionar, que las pruebas se hicieron alrededor de un mes procurando tener situaciones climatológicas similares, se compararon y analizaron los diferentes resultados obtenidos a lo largo del tiempo de prueba.

1 Climatización de espacios con energía geotérmica

1.1 ¿Qué es la geotermia?

La geotermia es una forma de energía renovable que proviene del calor almacenado en el interior de la Tierra. A lo largo de la historia, el ser humano ha utilizado el calor geotérmico con diversos fines, desde el calentamiento de viviendas hasta la generación de electricidad. Sin embargo, en los últimos tiempos, el creciente interés en la búsqueda de soluciones sostenibles y limpias ha impulsado un renovado enfoque hacia esta valiosa fuente de energía.

La existencia de energía al interior de la tierra se puede ver en diferentes manifestaciones como son los volcanes, las aguas termales, los géiseres, entre otras manifestaciones superficiales. El origen de esta acumulación de energía nos remonta a teorías e hipótesis del origen del sistema solar. Una de las hipótesis más aceptada en relación con la formación del sistema solar sugiere que éste emergió a partir de la acumulación gradual de polvo cósmico. Estas partículas, al condensarse bajo la influencia gravitacional del Sol, dieron origen a los diversos cuerpos celestes que constituyen el sistema solar. Con el avance de este proceso, la estructura de la Tierra experimentó un proceso de estratificación, resultando en la formación de múltiples capas concéntricas. Con el paso del tiempo, la capa superficial terrestre, la corteza, se fue enfriando gradualmente hasta solidificarse. No obstante, las capas internas no se enfriaron al mismo tiempo, principalmente porque la corteza tiene una baja capacidad para conducir el calor, lo que provocó un efecto aislante. Esta circunstancia permitió que las capas subyacentes mantengan temperaturas elevadas a pesar del enfriamiento superficial.

Como se mencionó anteriormente, la energía acumulada dentro de la Tierra tiene su origen desde la formación de esta. Sin embargo, existen diferentes medios por los cuales se sigue generando calor en la corteza. Algunas de ellas son:

- Decaimiento radioactivo: Una de las principales fuentes de calor en el interior de la Tierra es el decaimiento radioactivo de elementos inestables presentes en las rocas. Principalmente de los elementos uranio, torio y potasio los cuales sufren desintegración radiactiva, liberando energía en forma de calor. “La producción de calor de la corteza y el manto sería de un poco más de 1.5×10^{13} cal/seg, lo que hace un total de 4.7×10^{20} cal/año” (Prol-Ledesma, 2002).
- Diferenciación planetaria: Durante la formación de la Tierra, hace miles de millones de años, se produjo un proceso conocido como diferenciación planetaria. En este proceso, debido a la intensa actividad gravitatoria y la energía generada por el colapso y la acumulación de materia, se produjo una separación de materiales en capas. El núcleo de la Tierra, principalmente de hierro y níquel, se formó en el centro, y el calor generado en este proceso todavía se conserva y contribuye al calor geotérmico.
- Calor residual de la formación planetaria: La energía térmica liberada durante la formación de la Tierra y el proceso de acreción, cuando materiales y asteroides se acumularon para dar forma al planeta, también

contribuyeron al calor geotérmico. Aunque este calor residual ha disminuido con el tiempo, aún es una fuente significativa de energía térmica en el interior terrestre.

- Calor por compresión: En el manto terrestre, debido a las altas presiones, las rocas se calientan por el efecto de la compresión. Este proceso es conocido como calentamiento adiabático y contribuye al calor geotérmico que se encuentra en las capas más profundas de la Tierra.

La clasificación de la energía geotérmica según su temperatura es:

- Alta entalpía (alta temperatura): Corresponde a yacimientos con temperaturas mayores a 150 °C, éstas se encuentran en las zonas más activas de la corteza terrestre. Estas manifestaciones se usan para generación eléctrica en plantas geotérmicas.
- Media entalpía (media temperatura): Yacimientos con temperaturas entre 100 °C y 150 °C, este tipo de manifestaciones también permiten el aprovechamiento para generación eléctrica por medio de ciclos binarios. También es posible su utilización directa en aplicaciones industriales, sistemas de calefacción, entre otras.
- Baja entalpía (baja temperatura): Yacimientos con temperaturas entre 30 °C y 100 °C. Estas manifestaciones son aprovechadas en usos directos de la geotermia como son sistemas de calefacción, balnearios, invernaderos y procesos industriales.
- Muy baja entalpía (muy baja temperatura): Esta abarca toda la corteza terrestre donde no se tengan manifestaciones importantes de energía geotérmica, en estas zonas las temperaturas son menores a 30 °C. Su uso es en la climatización de espacios, y no requiere fluido geotérmico directo ya que utiliza bombas de calor, donde el suelo funciona como un intercambiador térmico.

En la ilustración 1 se muestran las diferentes aplicaciones de la energía geotérmica dependiendo la temperatura que se pueda extraer del subsuelo.

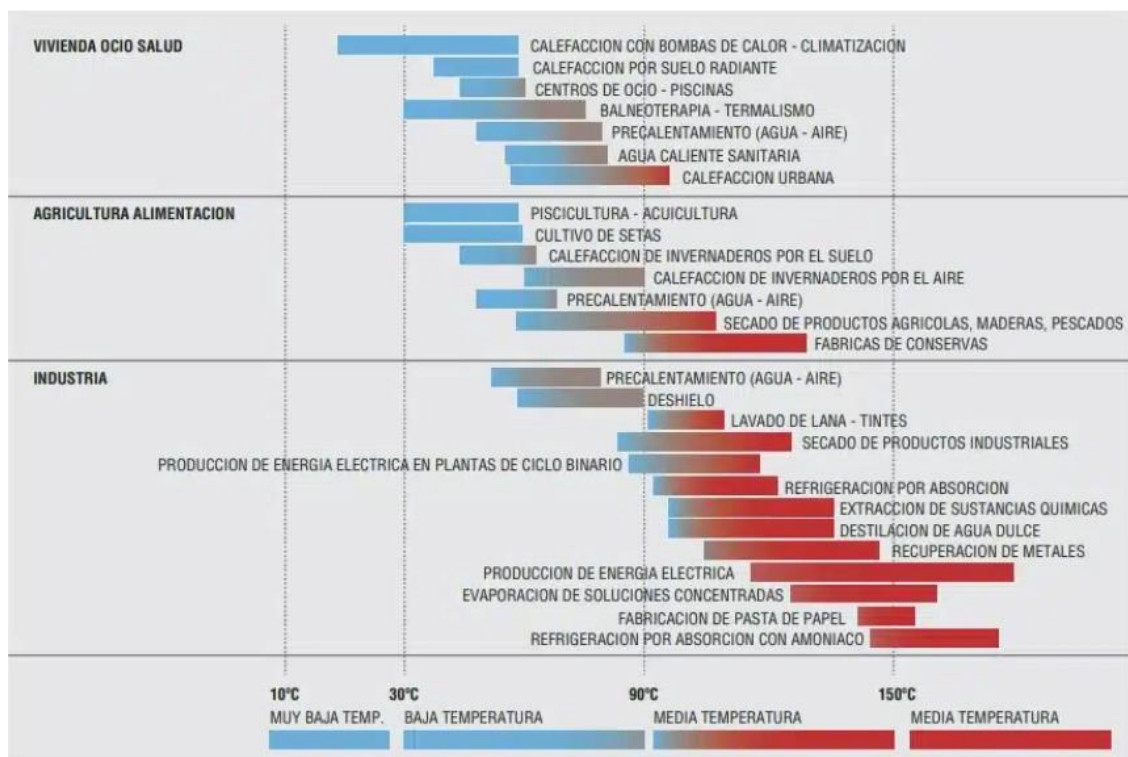


Ilustración 1. Diagrama de Lindal, muestra diversas aplicaciones de la geotermia en distintos sectores y a diferentes temperatura de suelo. (OVACEN, 2023)

1.2 Contexto mundial de las bombas de calor

Al momento en que se escribe este documento, se vive una crisis mundial respecto al cambio climático. En particular, respecto al calentamiento global. Algunos títulos que podemos encontrar respecto a estos temas son: “La era de la ebullición global ha llegado” (Paz, 2023) o “Científicos europeos declaran oficialmente julio como el mes más caluroso jamás registrado” (Agencia AP y Fanny Miranda, 2023). Como consecuencia de esta problemática se busca el desarrollo de nuevas tecnologías que implementen el uso de fuentes renovables, que sean eficientes y tengan el menor impacto posible al ambiente.

Dando un poco más de contexto histórico, el secretario general de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), António Guterres, ante las altas temperaturas registradas en el mes de Julio a nivel mundial, mencionó: “Las consecuencias son claras y trágicas: niños arrastrados por las lluvias monzónicas; familias que huyen de las llamas; trabajadores que se derrumban en un calor abrasador. La única sorpresa es la velocidad del cambio. El cambio climático está aquí. Es aterrador, y solo es el comienzo. La era del calentamiento global ha terminado. La era de la ebullición global ha llegado” (Paz, 2023).

Otros problemas que se presentaron ante la reciente ola de calor fueron: “De acuerdo con la Universidad de Reading, en Inglaterra, 61,000 muertos en Europa. Mientras que, en la zona norte de China, en la provincia de Sinkiang, se registró una temperatura de 52°C, la más alta en la historia de dicho país” (Paz, 2023).

Focalizando el problema en el continente europeo, “el parque de edificios de la Unión Europea es responsable de aproximadamente el 36% de todas las emisiones de CO₂. Teniendo en cuenta que casi el 50% del consumo de energía final de la Unión Europea se utiliza para calefacción y refrigeración, del cual el 80% se utiliza en edificios, el potencial de descarbonización de este sector es enorme. Hoy en día, el 75% del parque de edificios de la UE es energéticamente ineficiente.” (DAIKIN, 2021)

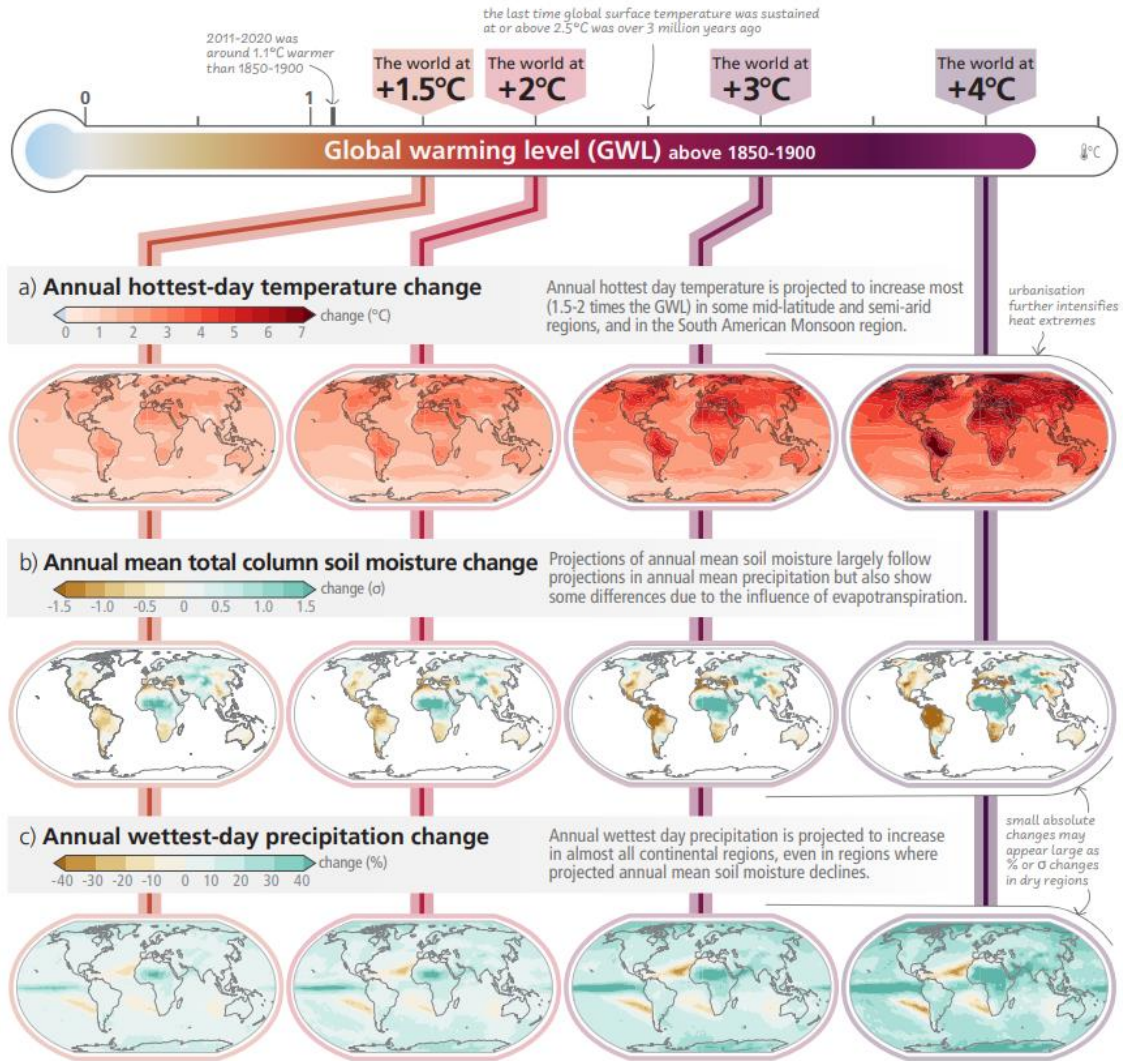


Ilustración 2. Cambios proyectados de la temperatura máxima diaria anual, la humedad total medida anual de la columna del suelo y la precipitación máxima anual de un día a nivel de calentamiento global de 1.5°C, 2°C, 3°C y 4°C en relación con 1850-1900. (Intergovernmental Panel On Climate Change, 2023)

Es importante mencionar que los equipos de climatización han contribuido al calentamiento global, debido a su alto consumo energético, el cual conlleva a grandes emisiones de gases de efecto invernadero para satisfacer la demanda energética. Un estudio del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), “pone de manifiesto que los aparatos de aire acondicionado pueden aumentar la temperatura del aire entre 1.5 y 2 °C en una ciudad como Madrid” (Salamanca, 2011), de acuerdo con el mismo artículo, “un aparato de aire acondicionado estándar expulsaría al exterior alrededor de un 30 % más de energía de la que extrae del interior de un edificio debido a su propio consumo energético” (Salamanca, 2011).

La tecnología de la bomba de calor es muy prometedora para dar una solución parcial al cambio climático, ya que esta apunta hacia el uso de energías renovables, disminución del consumo de energía y a una mayor eficiencia

energética reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero, por lo que ha tenido un gran impacto en diferentes regiones como Norte América, Europa y Asia para climatización.

“Durante la última década, el mercado europeo de las bombas de calor ha ido creciendo a un ritmo constante, con una tasa de crecimiento anual del 10 % entre 2011 y 2020, que ha tenido como resultado la instalación prevista de 1 millón de bombas de calor en el año 2021, lo cual indica un crecimiento de mercado del 39 % desde 2020” (DAIKIN, 2022).

De acuerdo con un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, “Si se mejora la eficiencia energética de la industria de la refrigeración y los electrodomésticos como aires acondicionados, se pueden cortar entre 210 000 y 460 000 millones de toneladas de emisiones de dióxido de carbono en las próximas cuatro décadas” (Noticias ONU, 2020).

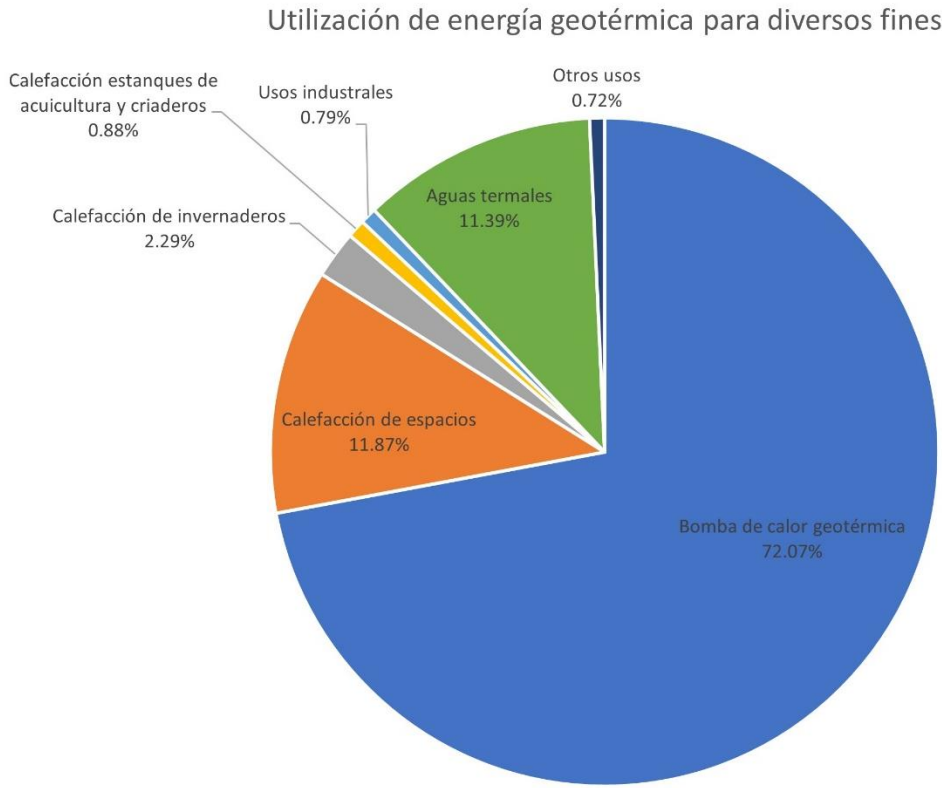


Ilustración 3. Utilización directa o indirecta de energía geotérmica para diversos fines (Lund & Toth, 2020).

Como se ha discutido a lo largo del capítulo y como se aprecia en la ilustración 3, el uso más extendido para aprovechamiento de energía geotérmica de baja y muy baja entalpía es la bombas de calor. En la actualidad, en México, Centroamérica y Sudamérica el uso de estos equipos no es muy popular, principalmente por sus elevados costos de instalación. Sin embargo, es una tecnología que cada vez es más conocida en estas zonas y dadas las diferentes condiciones climatológicas

de la región se puede llegar a implementar para cubrir necesidades humanas y al mismo tiempo tener un menor impacto ambiental.

1.3 Conceptos y principios fundamentales de las bombas de calor geotérmica

Una bomba de calor es una máquina térmica que tiene la particularidad de tener un ciclo reversible, esto quiere decir que puede funcionar tanto para calefacción como para refrigeración transfiriendo la energía calorífica de un punto a otro.

El funcionamiento de la bomba de calor se puede ver de manera simplificada como un ciclo de Carnot inverso, este involucra compresión, condensación, expansión y evaporación como se muestra en la ilustración 4.

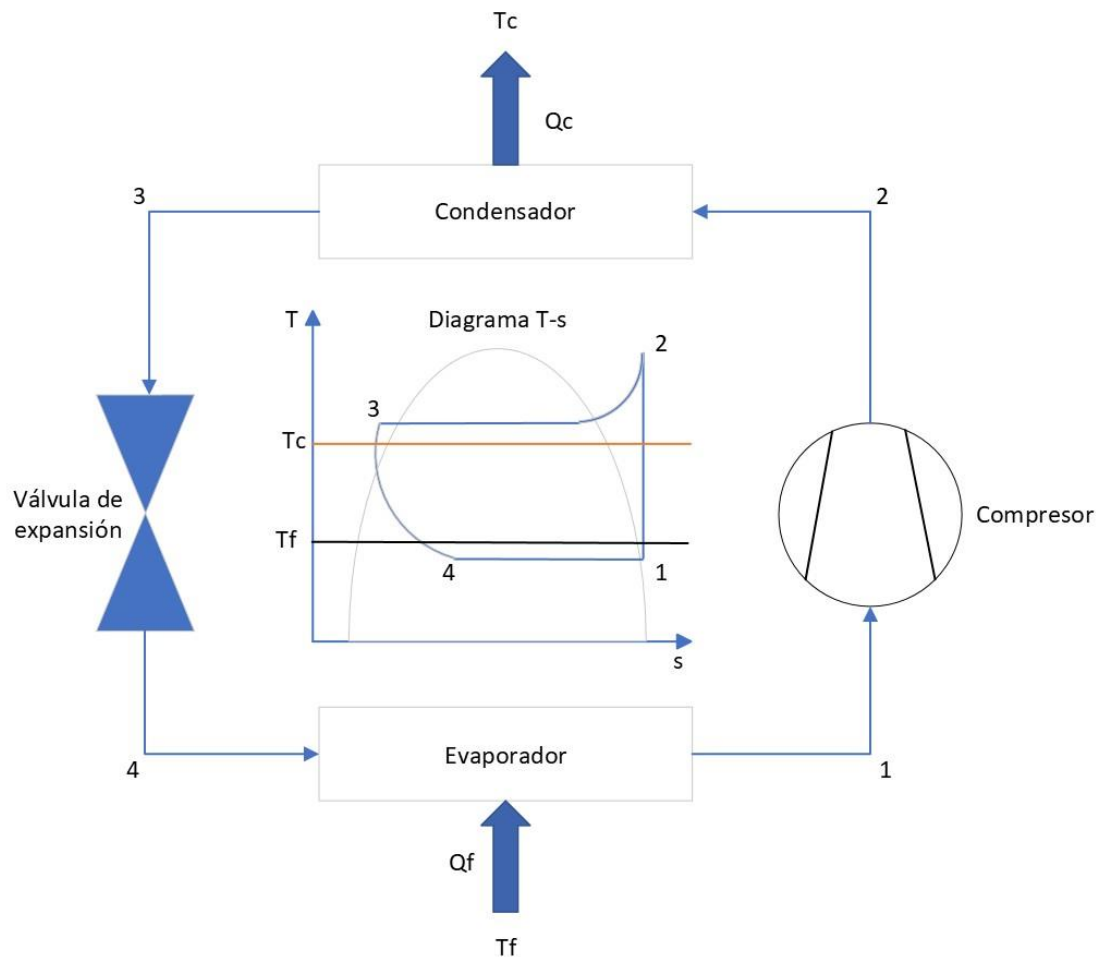


Ilustración 4. Esquema básico de ciclo de refrigeración de bomba de calor de compresión y diagrama Temperatura vs entropía del ciclo (Elaboración propia)

De la ilustración 4, se mencionará la función de cada componente para tener un mejor entendimiento del intercambio de energía dentro del sistema.

El compresor es una pieza clave ya que gracias a este se logra mantener la caída de presión entre el evaporador y el condensador para lograr el intercambio correcto de energía con el ambiente ya sea al exterior o al interior del recinto.

En el condensador, el vapor sobrecalentado que sale del compresor tiene un intercambio energético con un fluido externo (aire, agua o tierra) provocando que el refrigerante se enfríe y condense a líquido subenfriado para posteriormente entrar a la válvula de expansión.

En la válvula de expansión entra líquido subenfriado procedente del condensador, su función es lograr que el refrigerante pase de la presión del condensador a la del evaporador y evitar retorno del refrigerante, por lo que al mismo tiempo tiene la función de una válvula check.

Finalmente, en el evaporador, como su nombre lo indica, el refrigerante pasa a fase gaseosa, es importante que el vapor de salida sea sobrecalentado para evitar la entrada de líquido en el compresor. En este dispositivo hay intercambio térmico con una fuente externa (agua o aire) logrando que la energía térmica se traslade de un lugar a otro.

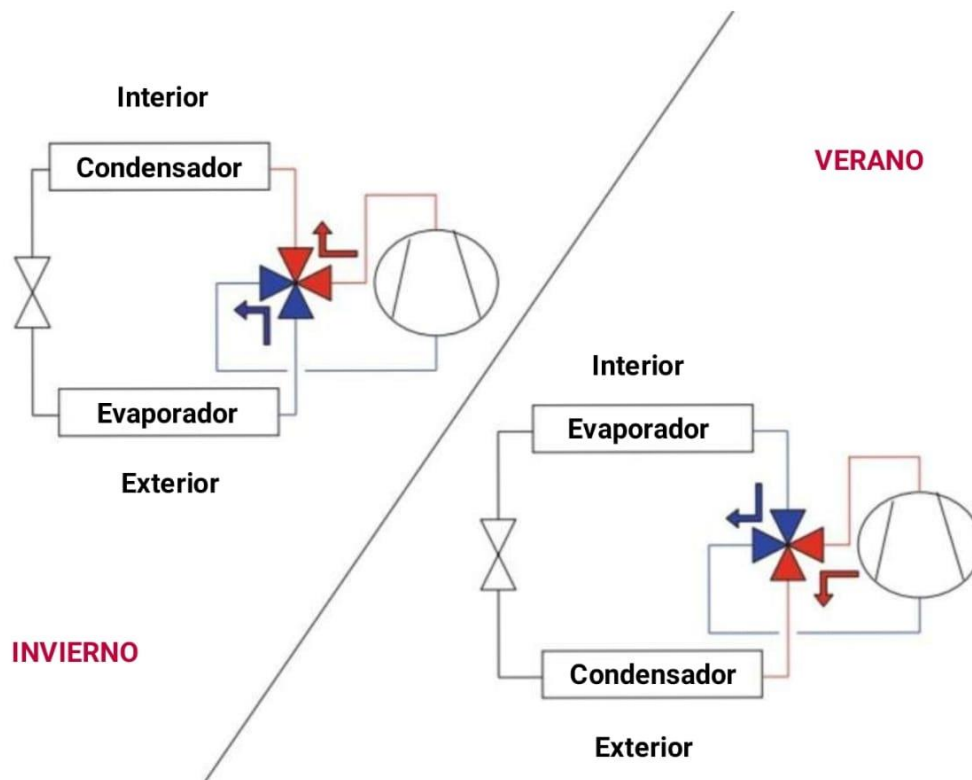


Ilustración 5. Operación de bomba de calor en invierno y verano. (Grassi, 2018)

Existen diferentes medios empelados en las bombas de calor para transportar el calor de un punto a otro. Las fuentes de calor exteriores pueden ser aire, agua (superficiales, subterráneas, residuales urbanas o industriales) y tierra, mientras que las fuentes de calor interiores son aire y agua ambiente por lo que los tipos de bomba de calor que existen son:

- Aire – Aire (Aeroterminia): Son los equipos de bomba de calor más usadas, también conocidos como aires acondicionados o splits, el funcionamiento

de este tipo de bomba de calor utiliza el aire exterior como fuente de calor en invierno y como sumidero de calor en verano.

- Aire – Agua (Aerotermia): Similar a la bomba de calor aire-aire, pero en lugar de transferir el calor directamente al aire interior, lo transfiere a un circuito de agua. Puede utilizarse para calefacción, refrigeración y suministro de agua caliente.
- Agua – Aire (Hidrotérmica): Aprovecha el calor almacenado en aguas subterráneas.
- Agua – Agua (Geotérmica): Esta bomba de calor utiliza agua subterránea como fuente de calor en invierno y como sumidero de calor en verano. Es altamente eficiente y constante en su rendimiento debido a la temperatura estable del agua subterránea.
- Tierra – Agua (Geotérmica): la bomba de calor extrae calor del suelo a través de tuberías enterradas. Puede requerir menos espacio que la opción de agua-agua, pero la eficiencia puede variar según la ubicación geográfica y el tipo de suelo.

Es importante mencionar que en algunas configuraciones se sustituye agua por salmuera como fluido de trabajo para el intercambio térmico con el exterior, esto debido a que tiene un punto de congelación menor que el del agua.

Hablando particularmente de la bomba de calor geotérmica. Este tipo de equipos, como se puede intuir por su nombre, aprovecha la energía almacenada en el subsuelo, donde utilizan la corteza como una fuente térmica en invierno y como sumidero de calor en verano, la ventaja de esta tecnología es que no se requiere que exista una anomalía geotérmica para su uso haciendo posible su instalación en cualquier lugar si se tiene el espacio requerido, esta tecnología se clasifica como geotermia de muy baja entalpia.

Las BCG se componen de tres elementos: 1) el intercambiador geotérmico (GHE), que se encarga de tener el intercambio térmico con la tierra; 2) la bomba de calor, que constituye el núcleo de los sistemas de bomba de calor geotérmica (GSHP), la cual contiene todos los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema (compresor, válvulas, controles, etc.); finalmente, 3) el sistema de distribución de aire acondicionado es el encargado de distribuir de la mejor manera el aire procesado en el recinto.

El GHE es una parte muy importante en el sistema, ya que debe tener la extensión suficiente para ceder o absorber la energía térmica del suelo, para esto existen diferentes configuraciones, algunas de ellas se muestran en la ilustración 6. Su selección es dependiendo de las características del terreno, el espacio que se requiera e incluso costos tanto de materiales como de instalación.

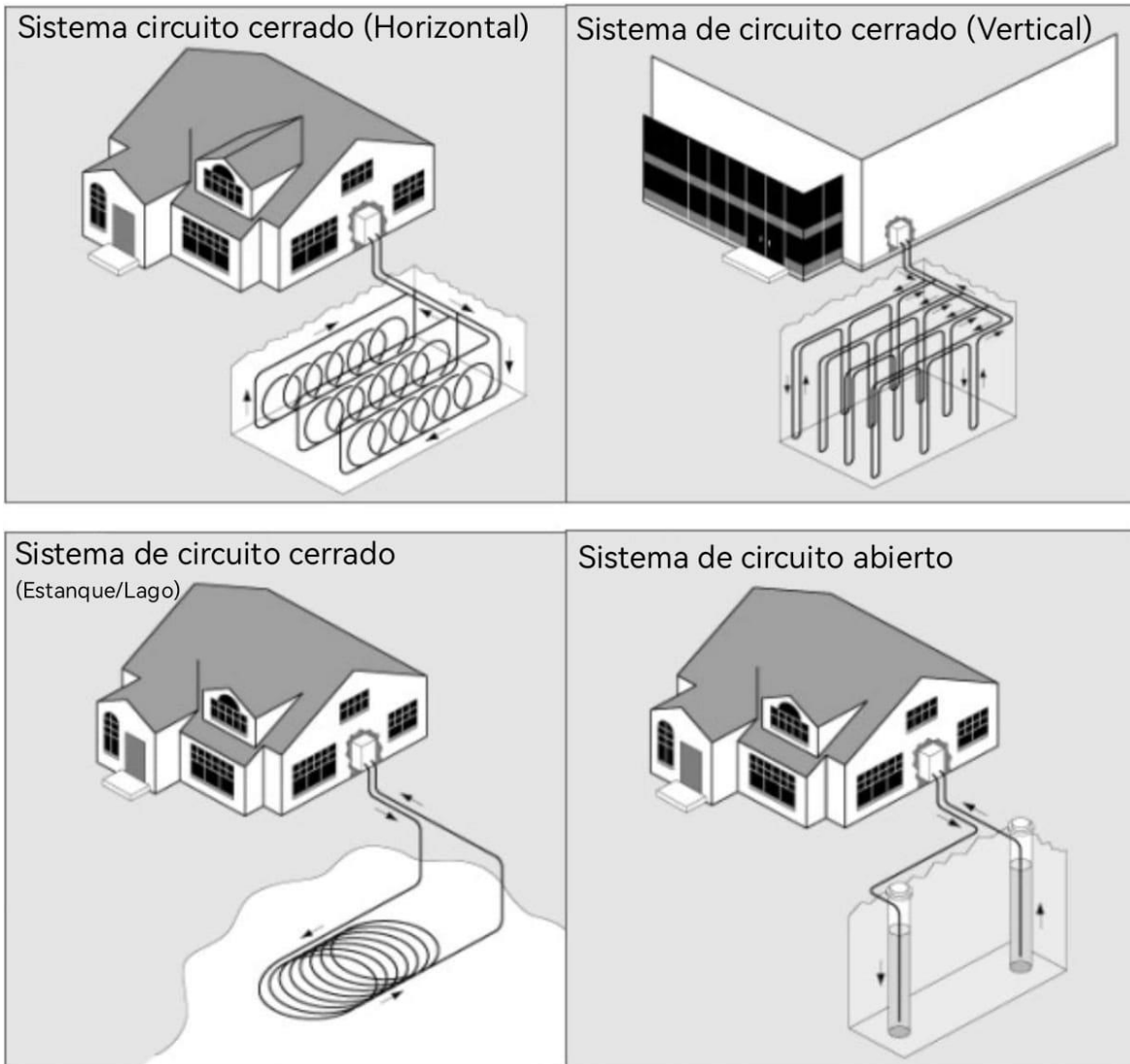


Ilustración 6. Tipos de intercambiadores de calor geotérmicos (Wu, 2009).

Ventajas que presentan frente a otros equipos o configuraciones son:

- Alta eficiencia energética: Debido a la temperatura casi constante del suelo, las bombas de calor geotérmicas tienden a ser más eficientes. El coeficiente de rendimiento (COP) de este tipo de bombas se encuentra entre 3-5.
- Menores emisiones de gases de efecto invernadero. Según el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE), las BCG utilizan entre un 25% y un 50% menos de electricidad que los sistemas convencionales de calefacción y refrigeración, reduciendo el consumo energético –y las emisiones correspondientes– de un 45% a un 70%, si se comparan con éstos (Sanchez Guzmán, Sanz López, & Ocaña Robles, 2011)
- Utiliza fuentes de energía renovables (geotermia), disminuye la dependencia de combustibles fósiles.

Desventajas de las BCG:

- Costo inicial: Debido a la necesidad de un intercambiador de calor geotérmico los costos se elevan por la excavación de la zanja, materiales e instalación de este.
- Espacio requerido para la instalación del GHE

1.3.1 Bombas de calor en México

La tendencia de climatización a nivel mundial va en aumento, México no es la excepción, tan solo entre los meses de enero a mayo del 2023, todos los fabricantes en su conjunto colocaron 60 654 aparatos de aire acondicionado en el país y de entre todas las gamas de precios y categorías. Pero estas cifras podrían considerarse todavía como conservadoras para México, porque empresas como Samsung y una docena de marcas chinas aún no reportan este tipo de cifras a la Asociación Nacional de Fabricantes de Aparatos Domésticos (ANFAD) (Lucas-Bartolo, 2023)

La industria del aire acondicionado en México muestra un crecimiento anual de entre 5 % y 10 % (Ibargüengoitia, 2018). Actualmente, la empresa LG Electronics estima que alrededor del 30 % de las residencias en México cuentan con equipo de climatización; además, se proyecta un aumento en la demanda de este tipo de sistemas si continúan las altas temperaturas.

De acuerdo con datos de la CONUEE entre el periodo de 2012 y 2016 (Tabla 1), “una estimación simplificada del consumo de electricidad para confort térmico muestra un crecimiento de 22 % en el consumo promedio de los usuarios en climas cálidos, con los usuarios en las tarifas 1b y 1c con crecimiento de más de 50 %, lo que refleja una acelerada expansión del uso del aire acondicionado en las zonas costeras y/o del sur” (Conuee, 2017).

Tabla 1. Consumo promedio anual por confort por tarifa de sector doméstico. (Conuee, 2017)

TARIFA	Consumo promedio anual por confort (kWh-usuario) 2012	Consumo promedio anual por confort (kWh-usuario) 2016	Crecimiento 2012-2016
1	NA	NA	NA
1a	NA	NA	NA
1b	199	310	56%
1c	513	772	50%
1d	795	936	18%
1e	1459	1664	14%
1f	2845	2997	5%
DAC	457	873	91%
TOTAL	NA	NA	NA
Cálido	663	806	22%

El ahorro de energía va de la mano con ahorro económico y, dada la matriz energética mexicana actual, menores emisiones de gases de efecto invernadero. “Los equipos de aire acondicionado de alta eficiencia tienen el potencial de evitar el gasto de 7 773 millones de pesos a los mexicanos; y permitirían, también, disminuir emisiones por 2.3 millones de toneladas de CO₂” (ANDIRA, 2023).

De acuerdo con la (IEA) para cumplir con los acuerdos nacionales existentes en materia de energía y clima en todo el mundo, las bombas de calor tendrán que satisfacer cerca del 20 % de las necesidades globales de calefacción de los edificios para 2030 y para alcanzar cero emisiones netas para 2050, las ventas deben aumentar más del 15 % anual a nivel mundial (Monschauer, Delmastro, & Martinez-Gordon, 2023).

En México, los usos directos de geotermia principalmente son en actividades de aguas termales, otros usos no han tenido tanto desarrollo. Sin embargo, existen proyectos donde se aprovecha esta energía; “Las primeras BCG se instalaron alrededor del 2014. En la actualidad, hay alrededor de 11 BCG instaladas con una capacidad combinada de 133 kWt operando como proyectos demostrativos en los estados de Puebla, Baja California y Michoacán. Estas unidades se han instalado en una pequeña escuela y clínica de salud, en invernaderos, en laboratorios, en la Universidad Politécnica de Mexicali y en la Universidad Michoacán de Morelia. Todas estas unidades están acopladas a tierra con arreglos tanto verticales como horizontales” (Lund & Toth, 2020). Además de estos dispositivos, otro uso directo empujado en México es el proyecto de un deshidratador de alimentos que funciona con energía geotérmica, instalada en el campo geotérmico Domo San Pedro, Nayarit.

2 Propuesta de refrigeración geotérmica

En un mundo cada vez más consciente de la importancia de la sostenibilidad y la eficiencia energética, se exploran soluciones innovadoras para abordar los desafíos del calentamiento global, consumo responsable de recursos. En este contexto, el presente documento expone la implementación de una bomba de calor geotérmica, una tecnología vanguardista que no solo ofrece un alivio crucial a los problemas de climatización. A lo largo de este documento, se explora con detalle el proceso de refrigeración con energía geotérmica de muy baja entalpía. En última instancia, la propuesta busca destacar la refrigeración geotérmica como una respuesta efectiva y sostenible a las necesidades de climatización del presente y del futuro.

2.1 Ubicación geográfica

La dirección del espacio es en el Edificio 8 del Instituto de Ingeniería, Circuito Escolar, Ingeniería S/N, C.U., Coyoacán, 04510, Cd. Mx.

En la ilustración 7 se muestra la orientación del edificio, esta es importante para considerar la trayectoria del sol a lo largo del año y conocer la ganancia energética obtenida gracias a este.



Ilustración 7. Imagen satelital del edificio 5 del instituto de ingeniería, UNAM (Google , 2023).

2.2 Dimensiones y estructura del recinto

Además de la ubicación geográfica, otro factor importante a considerar para climatizar un espacio son las dimensiones y la estructura arquitectónica, ya que estas conforman la envolvente del edificio, y con esta característica podemos saber la cantidad de energía que se necesita extraer o ingresar para climatizar el espacio. Para esto se deben de calcular la cargas térmicas tanto para refrigeración como para calefacción. En el caso particular de este documento se realizó para refrigeración.

Las dimensiones del recinto a acondicionar se muestran en la ilustración 8.

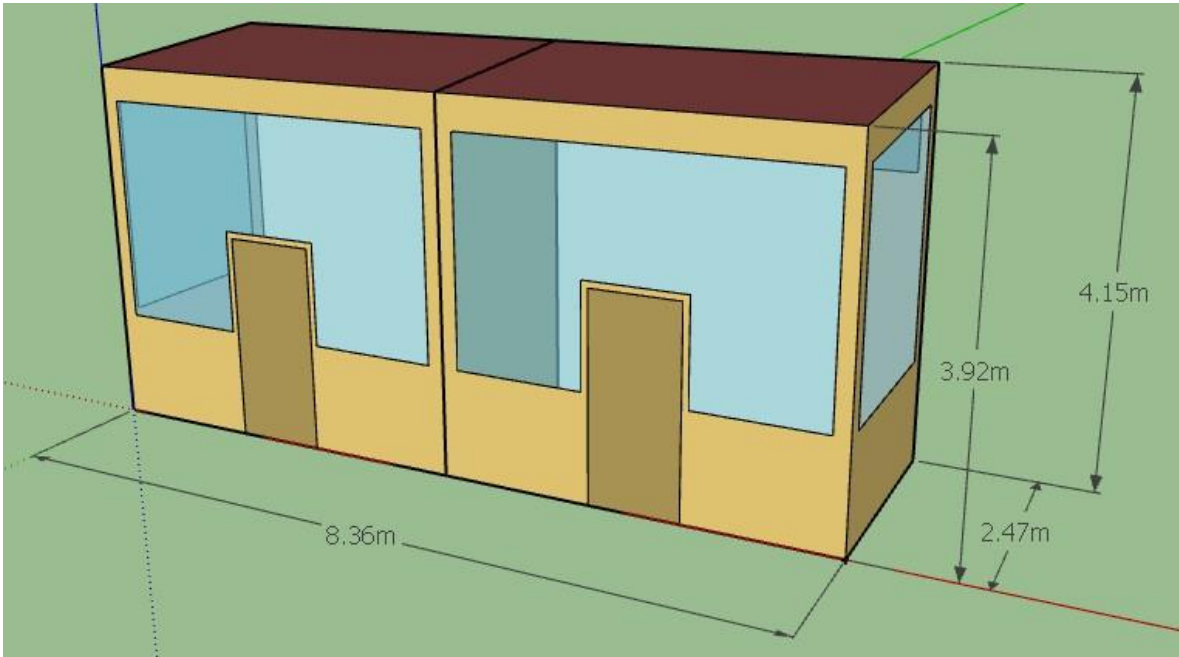


Ilustración 8. Dimensiones y simplificación digital del recinto a refrigerar (Sketch up)

Se realizó el análisis de cada pared simplificando por áreas equivalentes los materiales constructivos de cada una de ellas. A continuación se muestra cada muro del recinto con las dimensiones y materiales que lo conforman. Las dimensiones mostradas en las imágenes fueron las ocupadas para los cálculos de cargas térmicas.

2.2.1 Pared Norte

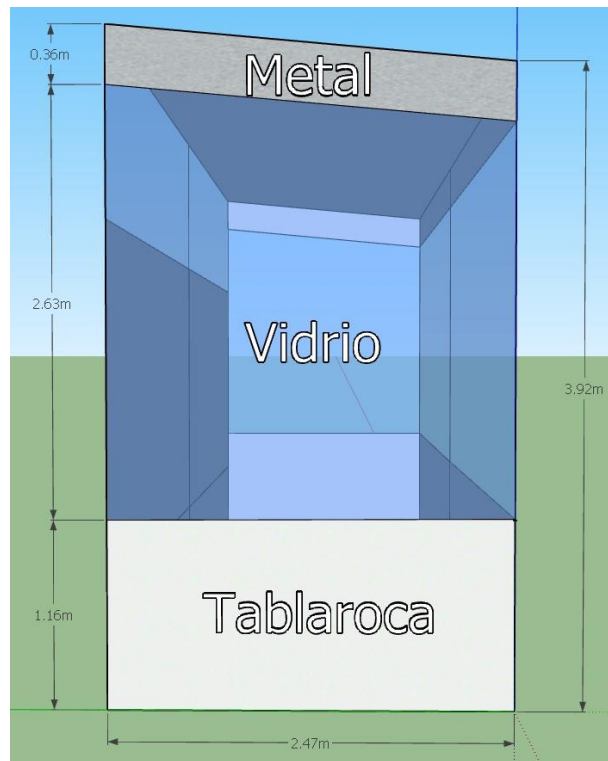


Ilustración 9. Dimensiones y materiales de pared norte (Sketch Up)

2.2.2 Pared Este

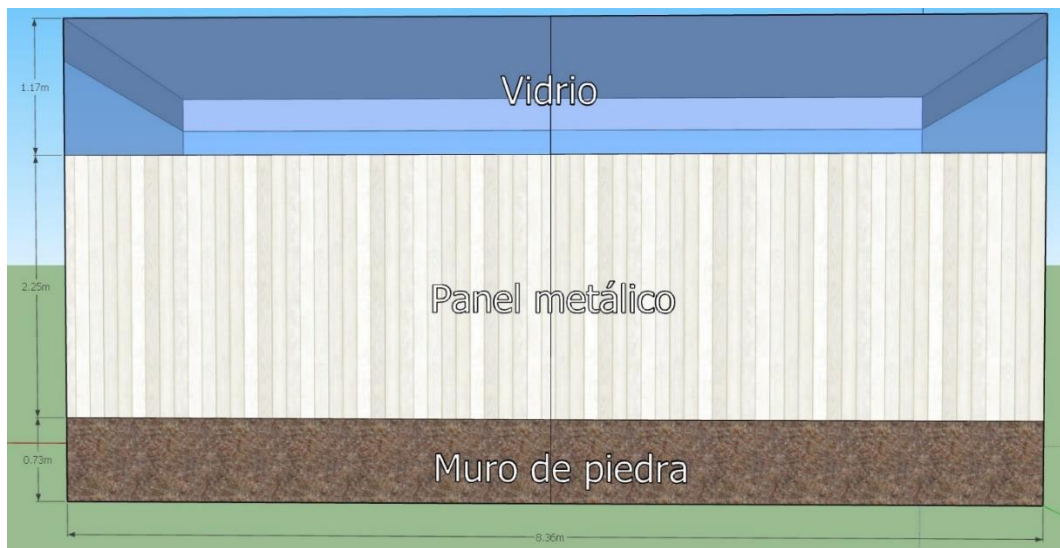


Ilustración 10. Dimensiones y materiales de pared este (Sketch Up)

2.2.3 Pared Oeste

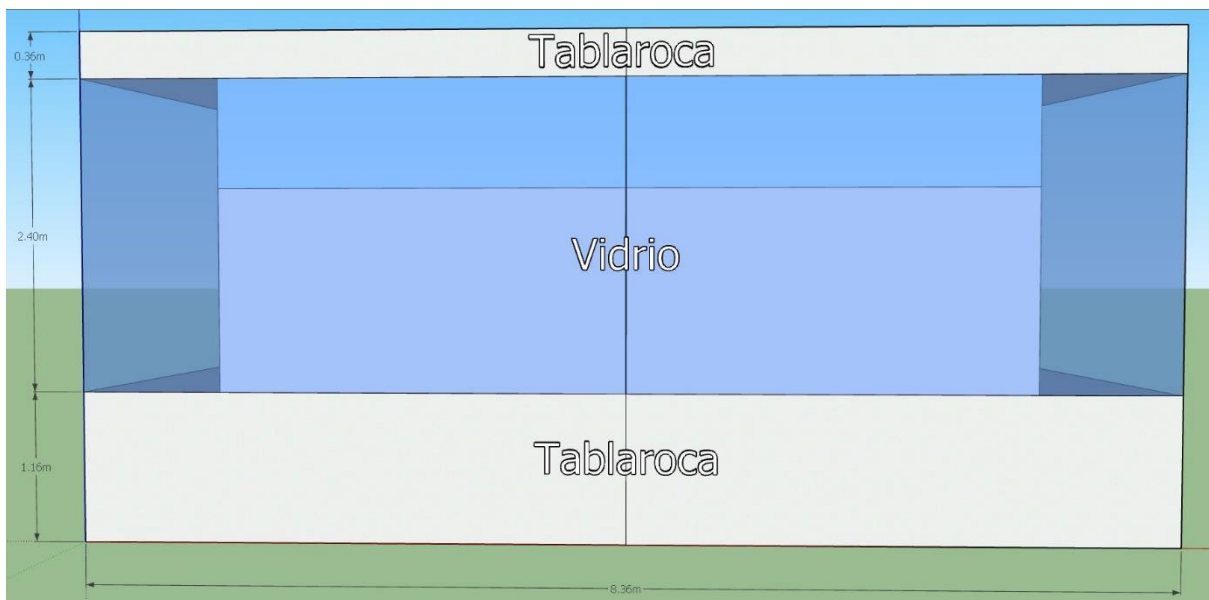


Ilustración 11. Dimensiones y materiales de pared oeste (Sketch Up)

2.2.4 Pared Sur

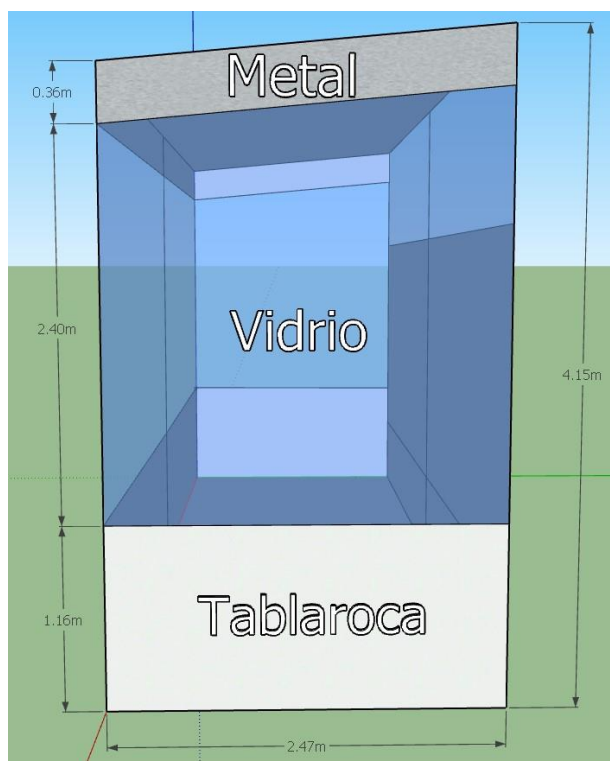


Ilustración 12. Dimensiones y materiales de pared sur (Sketch Up)

2.2.5 Techo

Dada la inclinación del techo, se realizó un análisis trigonométrico para saber el ángulo y obtener la distancia real del techo.

La inclinación del techo es de 5.32° , por lo que las medidas del techo son 2.48 m x 8.36 m. Resultando en un área total de 20.739 m^2 del techo.



Ilustración 13. Dimensiones y materiales de techo (Sketch Up)

2.3 Ocupación del recinto

La construcción seleccionada se divide en dos cuartos de las mismas dimensiones, uno es ocupado como oficina y el otro como laboratorio para producción de cerveza artesanal. Dado que el mismo equipo va a refrigerar las dos áreas, se necesita llegar a una temperatura que sea adecuada para ambas actividades. La temperatura se fijó entre 19.5°C y 20°C . Esto para tratar de llegar a un punto medio entre la temperatura de confort para la oficina y la temperatura necesaria para los procesos de la fabricación de cerveza.

2.4 Cálculos de cargas térmicas para refrigeración

El cálculo de cargas térmicas es un proceso que ayuda a definir la cantidad de calor que se necesita aportar o extraer de un local para lograr las condiciones de confort deseadas. Para esto se deben tomar en cuenta diversos factores que conforman el local como son la localización y los materiales.

En el caso particular de refrigeración, este cálculo se hace para conocer la cantidad de energía que se requiere retirar de un determinado espacio para poder mantener las condiciones adecuadas de confort. Los datos climatológicos que se ocupan para realizar los cálculos de cargas térmicas de refrigeración son los de verano. El propósito es mantener una sensación térmica fresca en el recinto mientras que las condiciones ambientales exteriores son calurosas.

Con base en “Volumen 5. Instalaciones de Servicio. Tomo III. Instalación de aire acondicionado” del gobierno de México se realizaron los cálculos de cargas térmicas que se presentan a continuación.

Tabla 2. Normales climatológicas para el cálculo de aire acondicionado en poblaciones de la República Mexicana (Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, 2022)

LUGAR DE LA REPÚBLICA	UBICACIÓN GEOGRÁFICA					DATOS DE VERANO				DATOS DE INVIERNO		
	Latitud N	Longitud O	A.S.N.M m	Presión Barométrica		Temperatura Prom. Máx. Ext. °C	Temperatura de Cálculo °C		Grados día Anuales °C	Temperatura Prom. Min. Ext. °C	Temperatura de Cálculo °C	Grados día Anuales °C
				mb	mm Hg		BS	BH				
CHIHUAHUA												
Chihuahua	28° 38'	106° 04'	1423	860	645	38.5	35	23	651	-11.5	-6	793
Ciudad Juárez	31° 44'	106° 29'	1137	889	667	43	39	24	695	-10	-5	1269
Ojinaga	29° 34'	104° 25'	841	925	694	50.0	45	24	883	-12.0	-6	680
DISTRITO FEDERAL												
Cd. México, Chapultepec	19° 25'	99° 10'	2240	780	585	33.8	30	17	78	-4.8	0	847
Cd. México, Tacubaya	19° 24'	99° 12'	2309	776	582	32.8	30	17	87	-6.5	-1	860

2.4.1 Consideraciones de temperatura

De la ecuación 1 se obtiene la temperatura de diseño exterior. La temperatura está en función de la temperatura máxima extrema del lugar. Este dato se obtiene de la Tabla 2.

$$t_c = 4.5 + 0.8t_{max} \quad (\text{Ec. 1})$$

Para la temperatura interior de diseño se debe tomar en cuenta la temperatura de diseño exterior, así como el tiempo de permanencia o de ocupación del espacio. Este último es muy relevante ya que mientras más personas y mayor tiempo de permanencia, habrá un mayor aporte de calor por las personas.

Para este proyecto se realizará para permanencia larga debido a que parte del espacio es ocupado como oficina.

$$t_i = 18 + 0.2t_e \quad (\text{Ec. 2})$$

t_i Temperatura interior
 t_e Temperatura exterior

Las temperaturas obtenidas para los cálculos fueron las siguientes:

Tabla 3. Temperaturas calculadas para análisis de cargas térmicas.

T. máxima	33.8 °C
T diseño exterior	32.92 °C
T diseño interior	24.58 °C

2.4.2 Cálculos de cargas sensibles para refrigeración

Las cargas sensibles están relacionadas directamente con la temperatura, son aquellas que ocasionan un cambio en la temperatura del recinto debido a la diferencia de temperaturas. Este tipo de cargas son ocasionadas principalmente por las siguientes ganancias de calor:

- Cargas por cerramientos opacos y translucidos.
- Cargas térmicas por radiación solar.
- Cargas por infiltración de aire.

- Cargas por ocupación del local.
- Cargas por iluminación,
- Cargas por máquinas.

2.4.2.1 Cargas por transmisión de cerramientos opacos y traslucidos.

Por cerramientos opacos se entiende que son elementos de una construcción los cuales no permiten el paso de la luz solar. Por ejemplo: techo y paredes. Por otro lado, los cerramientos traslucidos son aquellos que permiten el paso de la luz solar a través de ellos.

Se emplea la formula:

$$Q = UA(T_e - T_i) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

- Q Carga de calor [W]
- U Coeficiente global de transferencia de calor del cerramiento $\left[\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C} \right]$
- A Área neta [m²]
- T_e Temperatura exterior de diseño [°C]
- T_i Temperatura interior de diseño [°C]

U es calculado a partir de las resistencias térmicas de los materiales empleados en los cerramientos, es decir la suma de todas las resistencias al paso del flujo de calor a partir de la siguiente expresión.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \dots + \frac{1}{h_e}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

- U Coeficiente global de transferencia de calor del cerramiento $\left[\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C} \right]$
- e_x Corresponde al espesor del material [m]
- k_x Corresponde al coeficiente de conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{m \text{ } ^\circ C} \right]$
- h_i y h_e Corresponden a los valores de coeficiente convectivo interior y exterior respectivamente $\left[\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C} \right]$

Para los coeficientes convectivos se utilizaron los propuestos en el libro “Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración”. “Por costumbre y en virtud de que las variaciones, tanto de rugosidad como de velocidad del viento, se supone que no pasan de cierto límite, y para cálculos de ingeniería en aire

acondicionado se pueden suponer los siguientes valores:” (Hernández Goribar, 2017)

$$\text{Para interiores: } 9.37 \left[\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C} \right]$$

$$\text{Para exteriores: } 34 \left[\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C} \right]$$

Los resultados obtenidos de esta sección se pueden ver en la tabla 9 para cerramientos opacos y en la tabla 10 para cerramientos traslucidos.

2.4.2.2 Cargas térmicas por radiación solar

Se produce a través de la absorción de radiación solar directa y difusa a través de vidrios y otros materiales traslucidos. Se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$Q = q' \times f_1 \times A \quad (\text{Cuando no existe dispositivo sombreador}) \quad (\text{Ec. 5.1})$$

$$Q = q' \times f_2 \times A \quad (\text{Cuando sí existe dispositivo sombreador}) \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$Q = q'[(F \times f_2) + (1 - F \times f_1)] \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

Q Ganancia total en la ventana [W]

q' Ganancia máxima de calor en una ventana debido al efecto solar (Tabla 4)
 $\left[\frac{W}{m^2} \right]$

f₁ Factor de corrección cuando no existe dispositivo sombra (Tabla 3)

f₂ Factor de corrección cuando sí existe dispositivo sombra (Tabla 3)

F Fracción de ventana que se considera sombreado cuando existe un dispositivo parcial de sombreado

A Área de cristal [m²]

Para los factores f_1 y f_2 se obtienen de la siguiente tabla:

Tabla 4. Factores de corrección para diferentes tipos de dispositivos protectores contra la luz (Hernández Goribar, 2017)

Clases de vidrio	Factor para cristal sin sombra f_1	Persiana abierta a 45° (interior) f_2			Persiana abierta a 45° (exterior) f_2	
		Color claro	Color medio	Color oscuro	Color claro	Claro afuera, adentro oscuro
Vidrio común	1.00	.56	.65	.75	.15	.13
Placa regular de vidrio (¼ de pulgada)	0.94	.56	.65	.74	.14	.12
Vidrio que absorbe color:						
40 % a 48 % de absorción	.80	.56	.62	.72	.16	.11
48 % a 56 % de absorción	.73	.53	.59	.63	.11	.10
56 % a 70 % de absorción	.62	.51	.54	.56	.10	.10
Vidrio doble:						
vidrio común	.90	.51	.61	.67	.14	.12
placa regular de vidrio	.80	.53	.59	.65	.12	.11
vidrio común adentro, 48 a 56 % absorción exterior	.52	.36	.39	.43	.10	.10
placa regular interior	.50	.39	.39	.43	.10	.10
Vidrio triple:						
vidrio común	.83	.48	.56	.64	.12	.11
placa regular	.69	.47	.52	.57	.10	.10
Vidrio pintado:						
color claro	.28					
color medio	.39					
color oscuro	.50					
Vidrio polarizado:						
color ámbar	.70					
rojo oscuro	.56					
azul oscuro	.60					
verde oscuro	.32					
verde grisáceo	.46					
opalescente claro	.43					
opalescente oscuro	.37					

Para ganancia de calor solar a través de cristales (q') se ocupó la siguiente información:

Tabla 5. Ganancia de calor solar a través de cristales para una latitud de 20° (Hernández Goribar, 2017)

20° Latitud Norte		BTU por hora por pie cuadrado												20° Latitud Sur		
TIEMPO SOLAR →		6 AM	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6 PM	← TIEMPO SOLAR	
TIEMPO LOCAL →															← TIEMPO LOCAL	
Epoca del año	Fachada del edificio														Fachada del edificio	Epoca del año
JUN. 21	Norte	28	41	33	25	19	17	15	17	19	25	33	41	28	Sur	DIC. 22
	Noreste	81	154	144	122	83	38	15	14	14	14	12	9	3	Suroeste	
	Este	81	148	160	143	96	41	14	14	14	14	12	9	3	Este	
	Sureste	28	62	73	66	44	21	14	14	14	14	12	9	3	Noreste	
	Sur	3	9	12	14	14	14	14	14	14	14	12	9	3	Norte	
	Suroeste	3	9	12	14	14	14	14	21	44	66	73	62	28	Noroeste	
	Oeste	3	9	12	14	14	14	14	41	96	143	160	148	81	Oeste	
	Noroeste	3	9	12	14	14	14	15	38	83	122	144	154	81	Suroeste	
	Tragaluz plano	11	60	121	176	216	232	250	232	216	176	121	60	11	Tragaluz plano	
JUL. 23	Norte	20	28	23	17	15	14	14	14	15	17	23	28	20	Sur	ENE. 21
	Noreste	71	132	138	111	73	31	14	14	14	13	12	8	3	Suroeste	
	Este	75	148	163	145	99	46	14	14	14	13	12	8	3	Este	
	Sureste	31	70	85	79	57	29	14	14	14	13	12	8	3	Noreste	
	Sur	3	8	12	13	14	14	14	14	13	12	8	3	Norte		
	Suroeste	3	8	12	13	14	14	14	29	57	79	85	70	31	Noroeste	
	Oeste	3	8	12	13	14	14	14	46	99	145	163	148	75	Oeste	
	Noroeste	3	8	12	13	14	14	14	31	73	111	138	132	71	Suroeste	
	Tragaluz plano	8	55	118	175	216	240	251	240	216	175	118	55	8	Tragaluz plano	
AGO. 24	Norte	6	10	11	13	14	14	14	14	14	13	11	10	6	Sur	FEB. 20
	Noreste	45	111	118	89	50	18	14	14	14	13	11	7	2	Suroeste	
	Este	53	142	165	149	106	51	14	14	14	13	11	7	2	Este	
	Sureste	29	89	113	108	98	55	20	14	14	13	11	7	2	Noreste	
	Sur	2	7	11	14	20	24	26	24	20	14	11	7	2	Norte	
	Suroeste	2	7	11	13	14	14	20	55	98	108	113	89	29	Noroeste	
	Oeste	2	7	11	13	14	14	14	51	106	149	165	142	53	Oeste	
	Noroeste	2	7	11	13	14	14	14	18	50	89	118	111	45	Suroeste	
	Tragaluz plano	5	48	107	167	210	235	247	235	210	167	107	48	5	Tragaluz plano	
SEPT. 22	Norte	0	6	11	13	14	14	14	14	14	13	11	6	0	Sur	MAR. 22
	Noreste	0	83	87	59	22	14	14	14	14	13	11	6	0	Suroeste	
	Este	0	130	163	149	104	45	14	14	14	13	11	6	0	Este	
	Sureste	0	99	136	140	120	84	41	15	14	13	11	6	0	Noreste	
	Sur	0	8	22	38	52	63	65	63	52	38	22	8	0	Norte	
	Suroeste	0	8	22	38	52	63	65	63	52	38	22	8	0	Noroeste	
	Oeste	0	6	11	13	14	14	14	45	104	149	163	130	0	Oeste	
	Noroeste	0	6	11	13	14	14	14	14	22	59	87	83	0	Suroeste	
	Tragaluz plano	0	30	93	153	198	225	233	225	198	153	93	30	0	Tragaluz plano	
OCT. 23	Norte	0	4	9	12	13	14	14	14	13	12	9	4	0	Sur	ABR. 20
	Noreste	0	44	52	29	13	14	14	14	13	12	9	4	0	Suroeste	
	Este	0	99	147	141	100	49	14	14	13	12	9	4	0	Este	
	Sureste	0	91	145	150	149	119	74	27	13	12	9	4	0	Noreste	
	Sur	0	21	50	76	93	106	111	106	93	76	50	21	0	Norte	
	Suroeste	0	4	9	12	13	14	14	119	149	160	146	91	0	Noroeste	
	Oeste	0	4	9	12	13	14	14	49	100	141	147	99	0	Oeste	
	Noroeste	0	4	9	12	13	14	14	13	29	52	44	0	0	Suroeste	
	Tragaluz plano	0	18	68	127	171	196	208	196	171	127	68	18	0	Tragaluz plano	
NOV. 21	Norte	0	3	8	11	13	13	13	13	13	11	8	3	0	Sur	MAY. 21
	Noreste	0	24	26	14	13	13	13	13	13	11	8	3	0	Suroeste	
	Este	0	71	128	127	91	43	13	13	13	11	8	3	0	Este	
	Sureste	0	73	144	164	158	135	91	46	16	11	8	3	0	Noreste	
	Sur	0	28	69	100	123	136	141	136	123	100	69	28	0	Norte	
	Suroeste	0	3	8	11	16	46	91	135	158	164	144	73	0	Noroeste	
	Oeste	0	3	8	11	0	13	13	43	91	127	128	71	0	Oeste	
	Noroeste	0	3	8	11	0	13	13	13	13	14	26	24	0	Suroeste	
	Tragaluz plano	0	5	48	101	146	172	180	172	146	101	48	5	0	Tragaluz plano	
DIC. 22	Norte	0	2	7	11	12	13	13	13	12	11	7	2	0	Sur	JUN. 21
	Noreste	0	14	18	12	12	13	13	13	12	11	7	2	0	Suroeste	
	Este	0	56	118	121	85	34	13	13	12	11	7	2	0	Este	
	Sureste	0	59	139	167	159	134	97	60	20	11	7	2	0	Noreste	
	Sur	0	25	74	111	132	146	149	146	132	111	74	25	0	Norte	
	Suroeste	0	2	7	11	20	60	97	134	159	167	139	59	0	Noroeste	
	Oeste	0	2	7	11	12	13	13	34	85	121	118	56	0	Oeste	
	Noroeste	0	2	7	11	12	13	13	13	12	12	18	14	0	Suroeste	
	Tragaluz plano	0	4	36	92	135	161	170	161	135	92	36	4	0	Tragaluz plano	

En la tabla 11 se observan los resultados obtenidos de esta sección.

2.4.2.3 Cargas sensibles por ventilación o infiltración de aire

Se produce a través de la entrada de aire exterior en el recinto y del intercambio de aire que se deba tener de acuerdo con la ocupación que tenga el espacio para

mantener una calidad del aire adecuada. Se calcula con las siguientes expresiones:

$$Q = V \times 0.29 \times \Delta T \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

V Caudal de aire infiltrado por ventilación o infiltración $\left[\frac{m^3}{h}\right]$

0.29 Calor específico del aire a volumen constante

ΔT Diferencia de temperatura exterior e interior $[\text{°C}]$

“Cuando los espacios por acondicionar no están en edificios de gran altura, se suelen desprestigiar las ganancias de calor debido a las ranuras” (Hernández Goribar, 2017). Sin embargo, es importante la infiltración por la apertura más o menos constante de puertas. Este dato se obtuvo de la tabla 5 que se muestra a continuación.

Tabla 6. Infiltración en verano, debido a las aperturas de puertas para locales comerciales (Hernández Goribar, 2017).

Aplicaciones	Infiltración por personas en un cuarto (pies ³ /min)		Promedio de permanencia (min)
	Puerta giratoria (72 plg)	Puerta oscilatoria (36 plg)	
Banco	7.5	10	20
Peluquería	3.5	4.5	45
Oficina del cajero	5.0	6.5	30
Fuente de sodas	5.0	6.5	30
Tabaquería	15.0	20.0	10
Tienda de ropa (tienda chica) ..	5.0	6.5	30
Tienda de vestidos	2.0	2.5	75
Farmacia	10.0	13.0	15
Peletería	2.0	2.0	30
Comedor	5.0	6.5	30
Tienda de ropa para hombre	3.5	4.5	45
Despacho	2.5	3.0	60
Restaurante	2.0	2.5	75
Zapatería	3.5	4.5	45

Por otra parte, es importante considerar el volumen de aire nuevo que ingresará al local (aire de ventilación) el cual se determina en función de la actividad del local y está dado por personas o por espacio en m², este valor se obtiene de la tabla 6 y se calcula con la expresión antes mencionada seleccionando el valor de caudal adecuado para el caso del local a analizar.

Tabla 7. Aire exterior para ventilación (Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, 2022)

Aplicación	Ocupación máxima** estimada P/1000 pies ² ó 100 m ²	Requerimientos de aire exterior			
		PCM/ P	L/s/ P	PCM/ pie ²	L/s/m ²
Educación					
Salones de clase	50	15	8		
Laboratorios	30	20	10		
Bibliotecas	20	15	8	0.10	0.50
Corredores					
Auditorios	150	15	8		
Oficinas					
Área de oficinas	7	20	10		
Área de recepción	60	15	8		
Centros de comunicación y datos	60	20	10		
Salas de conferencia	50	20	10		
Alimentos y bebidas					
Comedores	70	20	10		
Cafetería, comida rápida	100	20	10		
Cocinas	20	15	8		
Deportiva y diversión					
Área de espectadores	150	15	8		
Sala de juegos	70	25	13		
Gimnasios	30	20	10		
Salón de baile	100	25	13		
Teatros					
Sala de estar	150	20	10		
Auditorio	150	15	8		

En las tablas 12 se pueden observar los resultados obtenidos para cargas sensibles por infiltración de aire exterior y cargas sensibles por ventilación de aire exterior.

2.4.2.4 Cargas sensibles por ocupación local

Se produce a través del calor emitido por las personas, como resultado de la actividad dentro del espacio y de procesos biológicos como la respiración.

$$Q = NP \cdot P_s \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

NP Número de personas

P_s Cantidad de calor sensible emitida por persona (Tabla 7)

Tabla 8. Calor producido por las personas, kcal/h. (Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, 2022)

Grado de actividad	Aplicación típica	Relación metabólica de un hombre adulto	Grupo de personas % de composición del grupo			Promedio de la relación metabólica	Temperaturas del cuarto °C									
			Hombre	Mujer	Niño		28		27		26		24		21	
							Sens.	Lat.	Sens.	Lat.	Sens.	Lat.	Sens.	Lat.	Sens.	Lat.
Sentado	Teatro	98	45	45	10	88	44	44	49	39	53	35	58	30	66	23
Sentado trabajo ligero	Escuela	113	50	50	0	101	45	55	49	52	54	47	60	40	69	32
Trabajo de oficina, actividad moderada	Oficinas, Hoteles, Deptos.	120	50	50	0	113	50	68	50	63	54	59	62	52	72	42
Parados; Caminando despacio	Tienda de ropa, Almacenes	137	10	70	20	113	50	68	50	63	54	71	62	52	72	42
Caminando, sentado, de pie, caminando despacio	Cafeterías Bancos	139	21	71	10	126	45	81	50	76	55	71	64	62	73	53
Trabajo sedentario	Restaurantes	126	50	50	0	139	48	91	55	83	60	78	71	68	81	58
Trabajo ligero	Fabrica, Trabajo ligero	201	60	40	0	189	48	141	55	134	62	127	74	145	92	72
Baile moderado	Salas de baile	227	50	50	0	214	55	159	62	152	69	145	82	132	101	113
Caminando, 5 kph	Fabricas, Trabajo algo pesado	252	100	0	0	252	68	184	76	176	83	169	96	156	116	136
Jugando	Boliche	378	75	25	0	365	113	252	117	248	122	243	132	233	152	213

En la tabla 13 se encuentran los resultados obtenidos de esta sección.

2.4.2.5 Cargas sensibles por iluminación

Se produce como su nombre lo indica a través del calor generado por la iluminación eléctrica. Este depende del tipo de foco y el consumo energético del mismo.

- Incandescentes

$$Q = E \cdot NL \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

E Consumo eléctrico del foco
 NL Número de lámparas

- Fluorescente

$$Q = E \cdot NL \cdot FB \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

E Consumo eléctrico [W]

- NL Número de lámparas
FB Factor de balastro (1.20 – 1.05)

En la tabla 14 se encuentran los resultados obtenidos de esta sección.

2.4.2.6 Cargas sensibles por máquinas

Se produce a través del aporte térmico que tienen diversos equipos al interior del recinto ya sea porque consumen energía y una parte se transforma en calor o por el trabajo que realizan proporciona calor al ambiente.

$$Q = PM \cdot N \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

- PM Potencia de la máquina
N Número de equipos

Los resultados de esta sección se encuentran en la tabla 15

2.4.3 Cargas latentes para refrigeración

Las cargas latentes están relacionadas directamente con la humedad del local, son aquellas que ocasionan una variación en la humedad del recinto. Este tipo de cargas son ocasionadas principalmente por las siguientes ganancias de calor:

- Cargas latentes por ocupación local
- Cargas latentes por infiltración de aire

2.4.3.1 Cargas latentes por ocupación local

Se produce a través del calor emitido por las personas, como resultado de la actividad dentro del espacio pero causando un impacto en la humedad del recinto.

$$Q = NP \cdot P_L \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

- NP Número de personas
P_L Cantidad de calor latente emitida por persona (Tabla 7).

En la tabla 16 se encuentran los resultados de esta sección.

2.4.3.2 Cargas latentes por infiltración de aire

Se produce a través del cambio de estado de la humedad en el aire, como resultado de la entrada de aire exterior en el recinto.

$$Q = V \cdot 0.72 \cdot \Delta\omega \quad (\text{Ec. 12})$$

- V Caudal de aire infiltrado por ventilación o infiltración $\left[\frac{m^3}{h}\right]$
 $\Delta\omega$ Diferencia de humedad absoluta entre el ambiente exterior e interior

0.72 es el producto de la densidad estándar del aire (1.2 [kg/m³]) por el calor latente de vaporización del agua (0.6[kcal/g]).

De acuerdo con la normatividad dada por el gobierno de México “Para los cálculos de sistemas de aire acondicionado de verano se debe considerar una humedad relativa de 50% ±10%” (Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, 2022).

Los resultados de esta sección se encuentran en la tabla 17.

2.5 Resultados de cálculos

Tabla 9. Resultados de cargas térmicas por cerramientos opacos.

Cargas por transmisión de cerramientos opacos				
Techo	[m ²]	U techo	Cargas térmicas [W]	Cargas térmicas [kcal/h]
Panel metálico	20.739	0.434	74.964	64.469
Total Techo			74.964	64.469
Pared Norte (interior)	[m ²]	U pared Norte	Cargas térmicas [W]	Cargas térmicas [kcal/h]
Metal	0.893	0.0082	0.061	0.052
Tablaroca	2.865	3.510	83.826	72.090
Total Pared Norte			83.887	72.143
Pared Oeste (interior)	[m ²]	U pared Oeste	Cargas térmicas [W]	Cargas térmicas [kcal/h]
Tablaroca (superior)	3.010	3.510	88.051	75.724
Tablaroca (inferior)	9.698	3.510	283.719	243.998
Total Pared Oeste			371.770	319.722
Pared Este (exterior)	[m ²]	U pared Este	Cargas térmicas [W]	Cargas térmicas [kcal/h]
Lámina c/espuma	18.81	0.362	56.686	48.750
Roca	6.103	3.495	177.793	152.902
Total Pared Este			234.479	201.652
Pared Sur (interior)	[m ²]	U pared Sur	Cargas térmicas [W]	Cargas térmicas [kcal/h]
Metal	0.893	0.0082	0.061	0.052
Tablaroca	2.865	3.510	83.826	72.090
Total Pared Sur			83.887	72.143

Tabla 10. Resultados de cargas térmicas por cerramientos traslucidos.

Cargas por transmisión de cerramientos traslucidos				
Pared Norte (interior)	[m ²]	U pared Norte	Cargas térmicas [W]	Cargas térmicas [kcal/h]
Vidrio	6.212	4.552	235.705	202.706
				0
Total			235.705	202.706
Pared Oeste (interior)	[m ²]	U pared Oeste	Cargas térmicas [W]	Cargas térmicas [kcal/h]
Vidrio	20.06	4.55	761.29	654.71
				0
Total			761.291	654.710
Pared Este (exterior)	[m ²]	U pared Este	Cargas térmicas [W]	Cargas térmicas [kcal/h]
Ventana	9.781	7.023	572.644	492.474
				0
Total			572.644	492.474
Pared Sur (interior)	[m ²]	U pared Sur	Cargas térmicas [W]	Cargas térmicas [kcal/h]
Vidrio	6.212	4.552	235.705	202.706
				0
Total			235.705	202.706

Tabla 11. Resultado de cargas térmicas por radiación solar.

Cargas térmicas por radiación solar	
Superficie traslucida [m ²]	9.7812
Radiación solar [W*m ² *°C]	520
Factor de corrección f1	1
Factor de corrección f2	0
Carga térmica por radiación solar [W]	130
Carga térmica por radiación solar [kcal/h]	111.8

Tabla 12. Resultados de cargas térmicas sensibles por infiltración y ventilación.

Cargas sensibles por infiltración de aire exterior	
Aire infiltrado [m ³ /h]	5.100
ΔT	8.336
Q [kcal/h]	12.329
Q [W]	14.336
Cargas sensibles por ventilación de aire exterior	
Aire infiltrado [m ³ /h]	10
Q [W]	234.323

Tabla 13. Resultados de cargas sensibles por ocupación del local.

Cargas sensibles por ocupación del local	
No. de personas	5
Q sen por actividad	62
Q personas[kcal/h]	310
Q personas [W]	360.465

Tabla 14. Resultados de carga térmica por iluminación.

Carga generada por iluminación	
Lamparas incandescentes	0
Lamparas fluorescentes	3
Qs incan	0
Qs descarga [kcal/h]	3.096
Q iluminación [W]	3.600

Tabla 15. Resultados de cargas térmicas por equipos.

Q equipo			
Equipo	Cantidad	Potencia [W]	Total [W]
Computadoras	3	200	600
Refrigerador	1	300	300
Secador	1	1500	1500
Impresora	1	100	100
Factor [W]	0.999		
Q equipo [W]	2497.5	Q equipo [kcal/h]	2147.85

Tabla 16. Resultados de cargas latentes por ocupación del local.

Cargas latentes por ocupación del local	
No. de personas	5
Q sen por actividad	42
Q personas[kcal/h]	210
Q personas [W]	244.23

Tabla 17. Resultados de cargas térmicas latentes por ventilación o infiltración de aire exterior.

Cargas latente por ventilación o infiltración de aire exterior	
Caudal del aire infiltr. O ventil. [m^3/h]	2349
$\Delta\omega$	0.0031
Q [kcal/h]	2.112
Q [W]	2.456

Tabla 18. Resultado final de la sumatoria total de cargas térmicas.

Cargas totales [kcal/h]	5281.43
Cargas totales [W]	6141.24

Si tomamos como referencia que 1 tonelada de refrigeración equivale a 3.52 kW, se necesita un equipo de 1.74 toneladas de refrigeración para poder refrigerar el espacio.

3 Metodología

Una vez fijado el espacio a refrigerar se realizaron mejoras en cuestión de aislamiento tanto térmico como de entradas o fugas de aire.

De acuerdo con los cálculos realizados, la pared que tienen un mayor intercambio energético es la pared Este (exterior) en cuestión de cerramientos opacos. Mientras que por parte de cerramientos traslucidos todos los vidrios tienen un gran impacto que es proporcional a su área en la transferencia de calor. Sin embargo, los cristales que se encuentran en la pared Este son los responsables de las cargas térmicas por radiación solar.

La selección de materiales se hizo considerando los siguientes puntos principales:

- Precio del material: Esto ya que las áreas que se requerían cubrir de acuerdo con los cálculos realizado eran mayores a 42 m² para las secciones de vidrio y para la pared norte de 18 m² por lo que, dependiendo los materiales, los precios se podían elevar demasiado.
- Propiedades de los materiales como aislantes térmicos.
- Facilidad de instalación y maniobrabilidad de los materiales.
- La ocupación del recinto: El espacio que se seleccionó para refrigerar está dividido en dos, una parte se ocupa como laboratorio de producción de cerveza artesanal, mientras que la otra mitad se emplea como oficina.
- Disponibilidad o facilidad de adquisición de materiales.

El espacio tiene dos secciones, una adecuada para trabajo de oficina, en la ilustración 14 se muestra el espacio antes de las modificaciones.



Ilustración 14. Sección de oficina antes de mejoras de aislamiento térmico

Por otra parte, se tiene otra sección que es un laboratorio de producción de cerveza artesanal, en la ilustración 15 se muestra el espacio antes de las modificaciones. Para ambas áreas se tomaron en cuenta los equipos que aportan calor al ambiente.



Ilustración 15. Sección de laboratorio de cerveza artesanal antes de mejoras de aislamiento térmico

3.1 Requerimientos técnicos

Dado que gran parte del recinto contaba con vidrio simple, sin ningún tipo de protección, se optó por usar plástico burbuja como aislante térmico ya que está constituido por plástico y aire, materiales de los cuales se sabe son malos conductores de calor. Otro factor de selección es su transparencia, permite la entrada de luz natural al espacio. La principal fuente de iluminación de esos espacios es la luz natural por lo que no se podían poner cuerpos opacos para el aislamiento en ventanas. El efecto que se pretende dar con este material es el de un termo que tiene un colchón de aire entre dos superficies. Para la radiación térmica, el material no es completamente traslucido por lo que se espera que una parte de la radiación solar no sea absorbida en el recinto.



Ilustración 16. Esquema de aislamiento de ventanas.

Por parte de los cerramientos opacos, la pared que tiene un mayor impacto térmico es la Este principalmente por el área que ocupa y por ser la única que tiene contacto con el exterior. Para mejorar el aislamiento térmico del cuarto se optó por instalar placas de poliestireno de 2.5 cm de espesor, este es un material muy utilizado como aislante, se emplea para hieleras, recipientes para comida, entre otros usos. Su coeficiente de conductividad térmica es 0.045 [W/m K] . También es un material muy liviano lo cual facilita su uso.

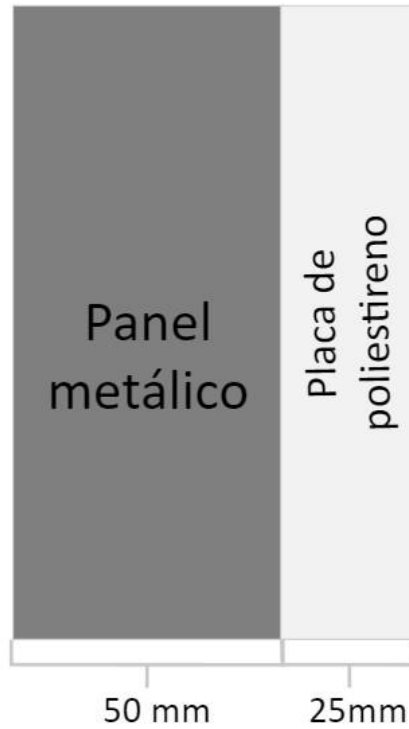


Ilustración 17. Esquema de aislamiento de pared opaca Este.



Ilustración 18. Aislamiento con plástico burbuja y placas de poliestireno

En la parte alta de las paredes norte y sur del cuarto se tenían aperturas de 16 cm de altura por lo que para cubrir estos espacios se construyeron estructuras con lámina y aislante de fibra de vidrio para evitar grandes fugas de aire y fugas térmicas. Se colocaron dos láminas galvanizadas y en la parte central se colocó una capa de 50 mm de grosor de aislante (fibra de vidrio). En las ilustraciones 19 y 20 se aprecia los modelos digitales realizados para su posterior manufactura.

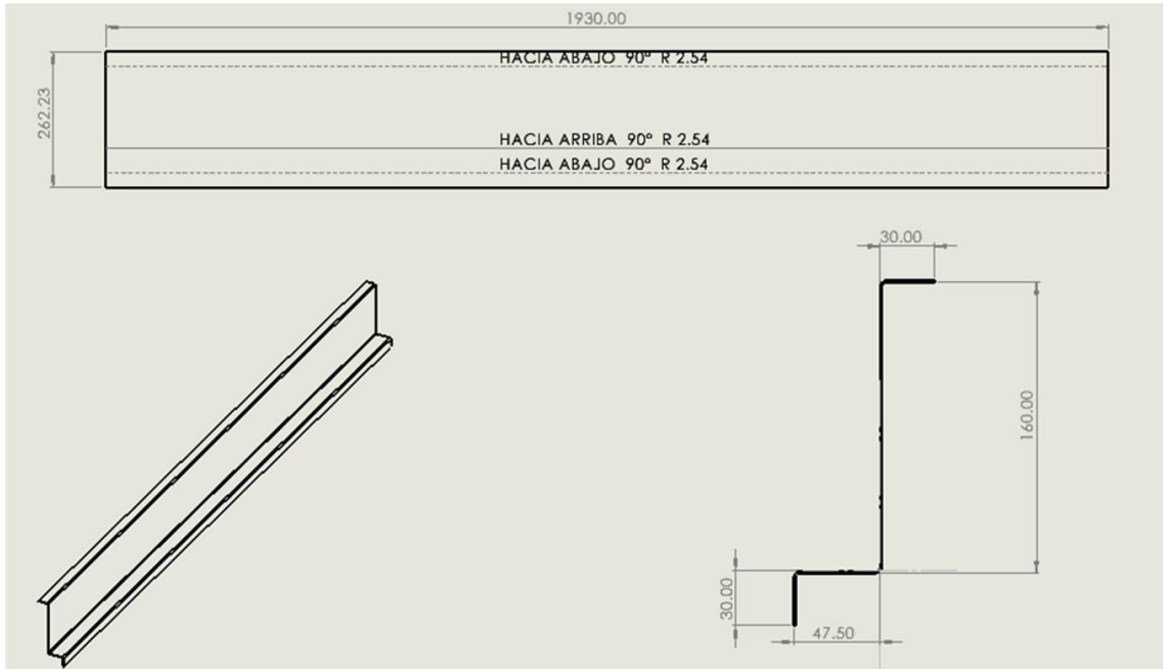


Ilustración 19. Plano estructura de lámina galvanizada

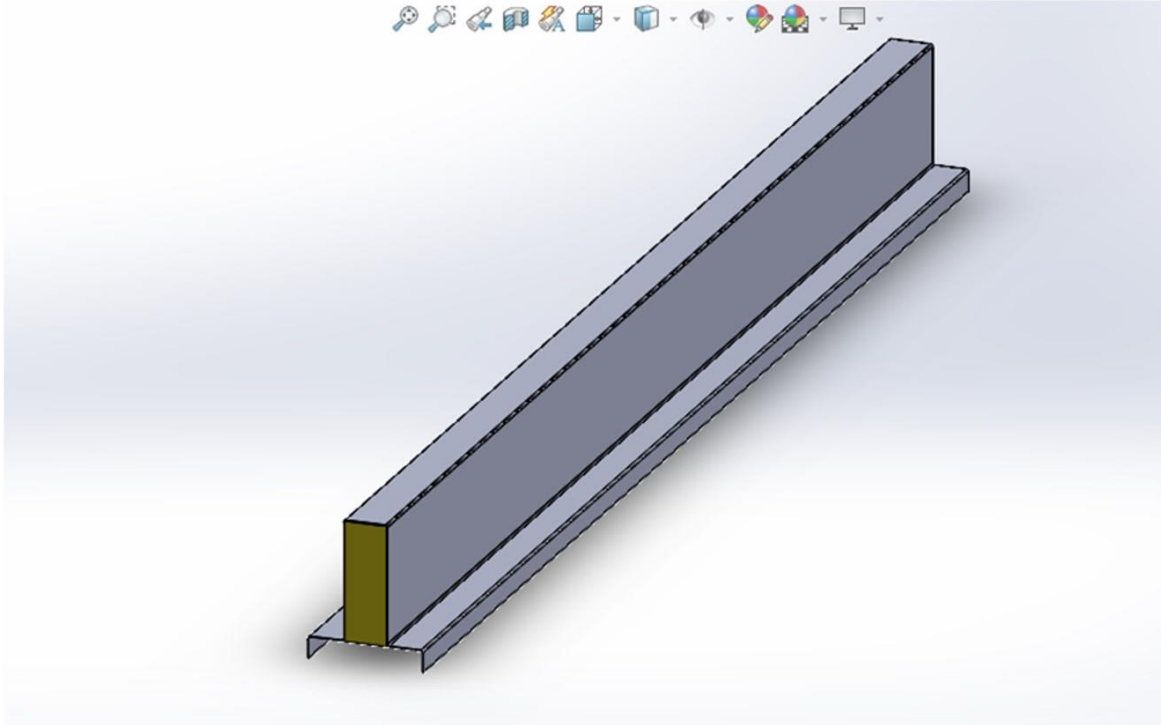


Ilustración 20. CAD de estructura final de lámina galvanizada y fibra aislante

En la ilustración 21 se puede apreciar diferentes etapas de la manufactura, así como en ensamble final, y en la ilustración 22 se puede apreciar la estructura ya colocada.

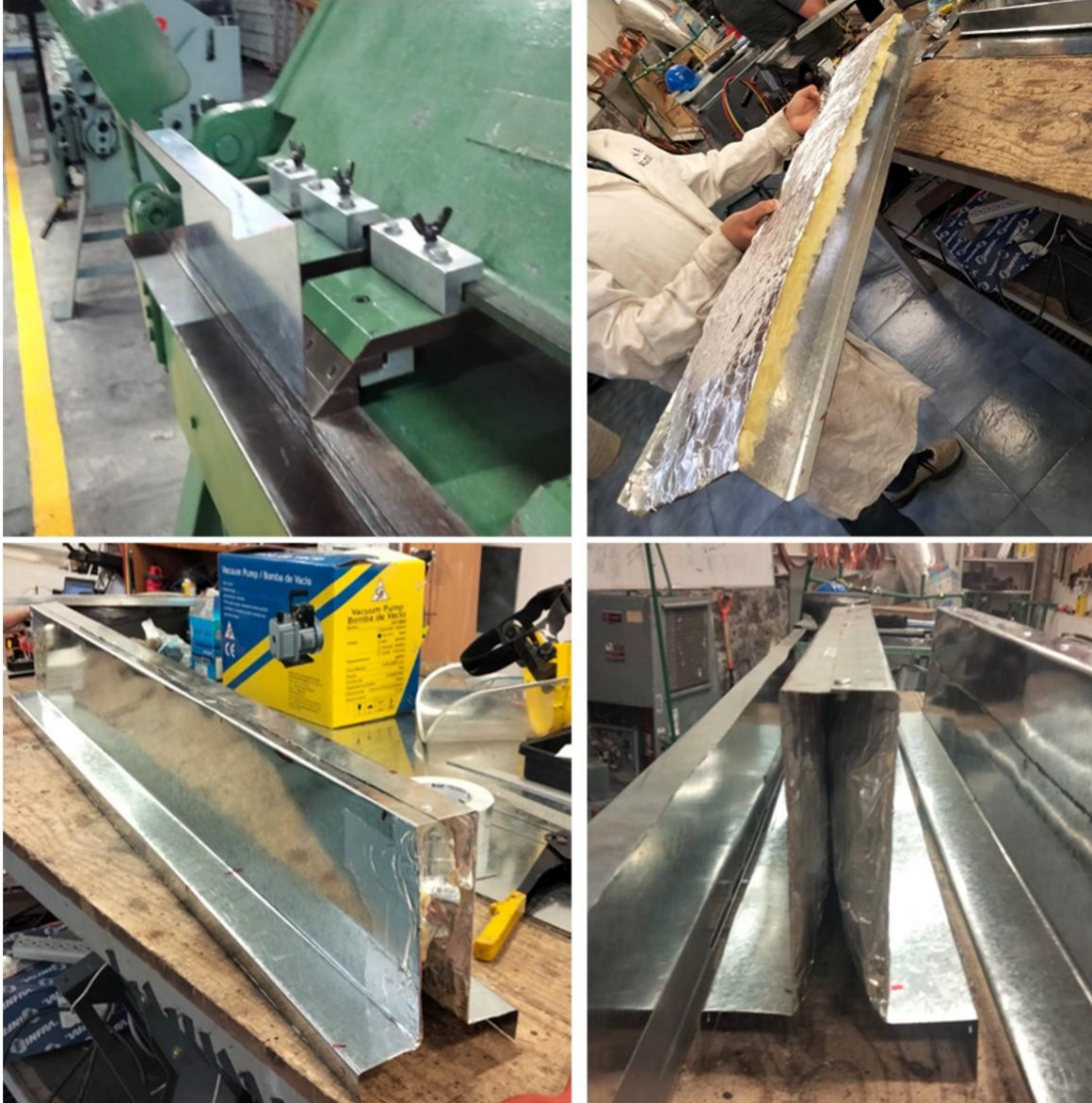


Ilustración 21. Proceso de manufactura y armado final de estructura de lámina con aislante.

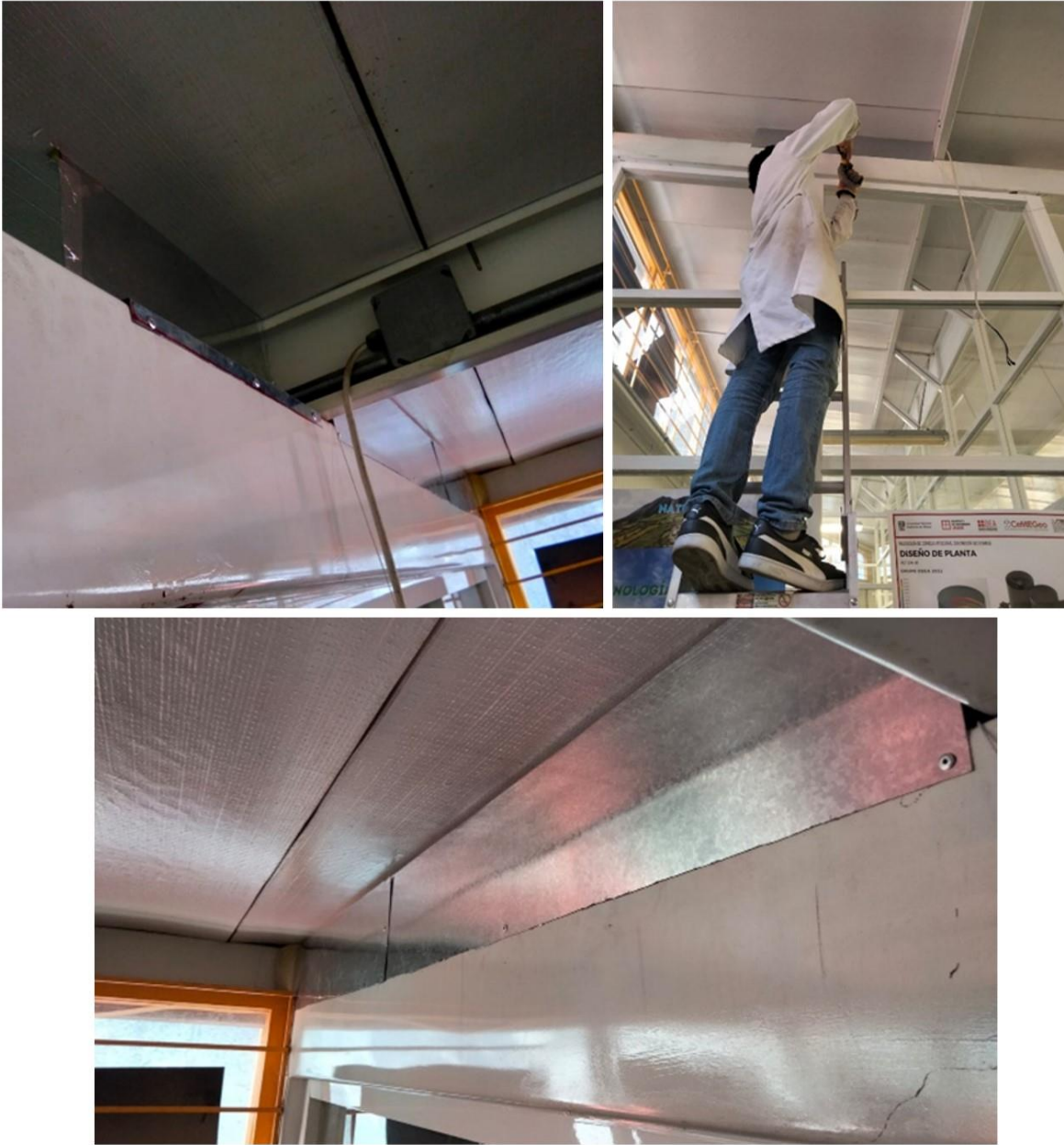


Ilustración 22. Instalación final de estructuras aislantes de paredes Norte y Sur

3.2 Características operativas de la bomba de calor geotérmica

El equipo para refrigerar el espacio fue una bomba de calor de fuente agua

Tabla 19. Especificaciones técnicas de la BCG

Número de modelo	GEVE03622G02A0TR00100001
Refrigerante	R-410A
Tamaño Nominal	36.0 MBH = 3 TR
Voltaje (Volts/Hz/Fase)	230/60/1
Circuito de refrigeración	Calefacción y Refrigeración

Flujo de agua	$0.45 \frac{L}{s} - 0.57 \frac{L}{s}$
Temperatura de entrada de agua	$7.2^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$

Para simular el intercambiador geotérmico se diseñó un circuito de agua con ayuda de un depósito de agua de 1500 litros, esto permitía que la temperatura del agua no se elevara mucho durante las pruebas, sin embargo, sí existía un aumento de temperatura durante el uso del equipo.



Ilustración 23. Depósito de agua para simular el intercambiador geotérmico

3.3 Sistema de distribución de aire

El sistema de distribución de aire se diseñó para que los dos espacios tuvieran su respectiva salida de aire con un difusor circular para una mejor distribución de aire frío.

Para calcular las dimensiones de los ductos se utilizó un ductulador, este es un instrumento que sirve para determinar las dimensiones de los conductos para los sistemas de climatización.

El ductulador empleado fue descargado de la página de la empresa McQuay®. Las entradas que pide el programa son:

- Caudal [L/s]
- Pérdida de carga [Pa/m]
- Velocidad [m/s]

- Diámetro equivalente [mm]

Para que opere el ductulador se deben ingresar dos datos de los anteriormente mencionados.

En el caso particular de este proyecto se ocuparon la velocidad del aire y el caudal, estos valores fueron obtenidos del documento “CARACTERIZACIÓN DEL VENTILADOR” del proyecto Bomba de Calor Geotérmica 3TR.

“Al calcular ductos de aire se deben considerar preferentemente sistemas de baja velocidad, donde la velocidad máxima no sea mayor de 10 m/s (2000 ppm)” (Secretaría de Educación Pública, 2022).

Del cálculo de cargas térmicas tenemos que se requieren 6.14 [kW] para acondicionar el espacio, equivalente a 1.74 toneladas de refrigeración, redondeando se requieren 2 toneladas de refrigeración.

Para el cálculo del caudal, se trabajará con un estándar de 400[CFM] por cada tonelada refrigeración. Por lo tanto, se requerirán de 800[CFM] ($\approx 378 \left[\frac{L}{s} \right]$).

El caudal de 800[CFM] y velocidad de 2000 [ppm] fueron ocupados para la primera sección de ductos.

Ingresando estos valores al ductulador se obtiene que el diámetro equivalente del ducto debe ser de 219.4 mm que es igual a 8.6 pulgadas. Dado que comercialmente no se tenía esa medida, se tuvo que decidir si realizar la instalación con ducto de 10 pulgadas o de 8 pulgadas. Finalmente se seleccionó el ducto de 8” ya que si se seleccionaba un ducto más ancho podía afectar de manera considerable el flujo del aire.

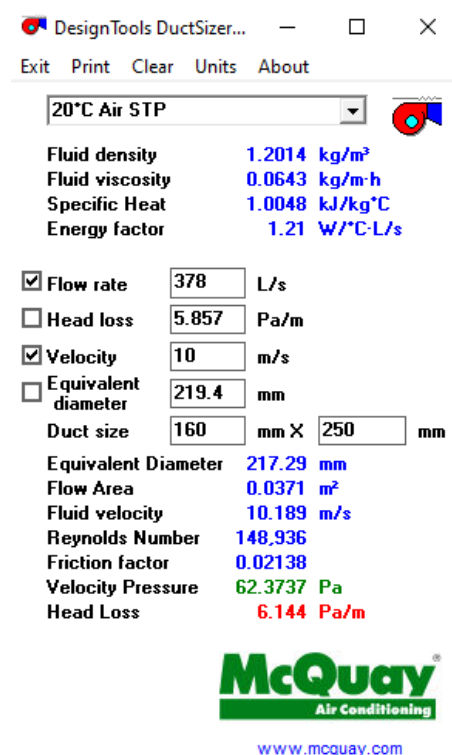


Ilustración 24. Resultado de dimensiones de ducto necesitado sección 1 (ductulador comercial McQuay).

Para la segunda sección se dividirá en dos ductos para que exista una mejor distribución del aire dentro del recinto. Para cada sección se tomará 1 tonelada refrigeración por lo que se tomará para cada tramo de ducto 400[CFM] y la misma velocidad antes mencionada.

Con esta información se obtuvo que el diámetro equivalente para el ducto tenía que ser de 155.1 mm o bien 6.1 pulgadas. Se seleccionó ducto de 6”.

DesignTools DuctSizer... — □ ×

Exit Print Clear Units About

20°C Air STP

Fluid density 1.2014 kg/m³
 Fluid viscosity 0.0643 kg/m·h
 Specific Heat 1.0048 kJ/kg°C
 Energy factor 1.21 W/°C·L/s

Flow rate 189 L/s
 Head loss 9.031 Pa/m
 Velocity 10 m/s
 Equivalent diameter 155.1 mm
 Duct size 160 mm X 125 mm

Equivalent Diameter 154.3 mm
 Flow Area 0.01870 m²
 Fluid velocity 10.107 m/s
 Reynolds Number 104,917
 Friction factor 0.0233
 Velocity Pressure 61.3771 Pa
 Head Loss 9.279 Pa/m

McQuay
Air Conditioning

www.mcquay.com

Ilustración 25. Resultado de dimensiones de ducto necesitado en sección 2 (ductulador comercial McQuay).

Para ambos tramos se ocupó el producto G FLEX de Glassfiber, este es ducto flexible de poliéster cubierto con aislante de fibra de vidrio. En la ilustración 24 se aprecia la construcción y materiales del ducto.



Ilustración 26. Construcción y materiales de ducto G flex de Glassfiber. (GLASSFIBER, 2023)

En la ilustración 25 se muestra parte del proceso de instalación de ductos.



Ilustración 27. Instalación de ductos

3.4 Instrumentación y recolección de datos

Dado que este caso es particularmente refrigeración, se realizaron las pruebas en los horarios más calurosos del día. El horario seleccionado fue de 14:00 p.m. a 16:00 p.m. esto para procurar tener las mismas condiciones atmosféricas a lo largo de los días, es importante mencionar que la prueba se limitó a dos horas ya que mientras mayor era el tiempo de uso del equipo más se calentaba el agua del sistema de simulación de intercambiador geotérmico. Para el desarrollo de las pruebas se realizó en un mismo horario para procurar tener las mismas condiciones climáticas.

La recopilación de datos se hizo con ayuda de diferentes sensores. Las variables de las cuales se recopilaron datos fueron:

- Temperaturas [°C]
- Humedad relativa [%]
- Presión [psi]
- Flujo de agua $\left[\frac{L}{s}\right]$
- Consumo eléctrico [kVA]

Para mayor entendimiento de la instrumentación y la toma de datos se dividirá en 3 secciones: sistema de distribución de aire, bomba de calor y circuito de agua.

3.4.1 Sistema de distribución de aire

Los datos recolectados dentro del recinto fueron:

- Temperatura [°C]
- Humedad relativa [°C]

Para la toma de datos se hicieron en diferentes puntos y a diferentes alturas para hacer un mapeo térmico con el propósito de conocer mejor la distribución y el comportamiento del aire dentro del espacio. El cuarto se dividió en 4 secciones, las alturas de medición fueron a 0.5 m, 0.98 m, 1.96 m y 2.94 m de altura todas respecto al piso. En la Ilustración 26 se muestran las alturas respecto al piso para la colocación de sensores. El caso ideal para realizar un mapeo térmico es tomar las mediciones en un mismo evento en distintos puntos del recinto para observar el comportamiento del aire en el enfriamiento del cuarto. En este caso particular no se pudo realizar de esa forma debido a la cantidad limitada de sensores por lo que se trató de mantener las condiciones ambientales y temporales lo más parecidas posibles, realizando las pruebas en un mismo horario con condiciones climáticas similares. Sin embargo, la forma en que se realizó implica que el error en el análisis aumente ya que cuestiones como la humedad del ambiente, la cantidad de nubes, entre otros factores ambientales son muy difíciles de replicar con exactitud de manera natural.

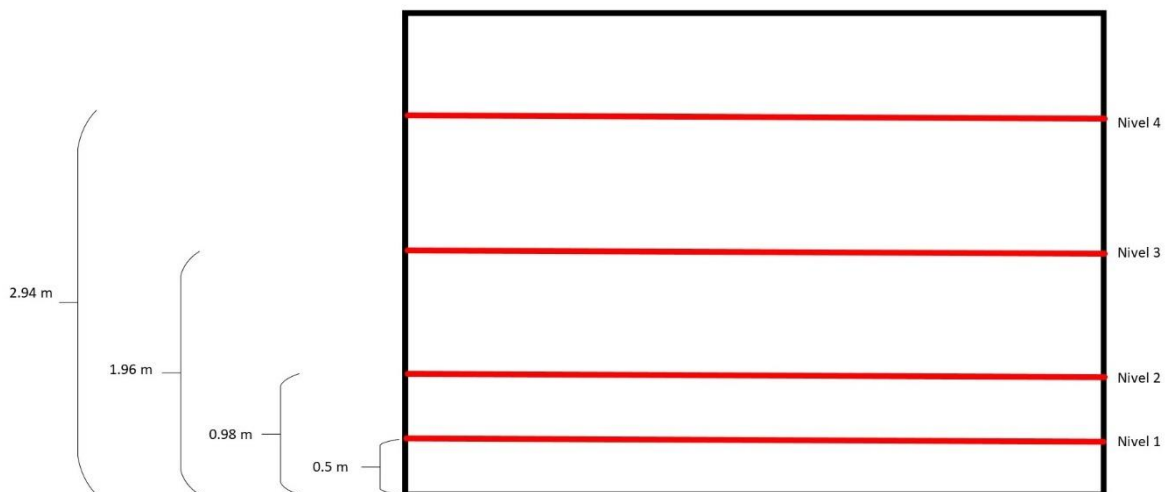


Ilustración 28. Distribución de sensores por prueba para mapeo térmico

Se emplearon 4 sensores HOBO MX2301 como el que se muestra en la ilustración 27, estos recabaron datos de temperatura y humedad relativa cada minuto durante las pruebas.



Ilustración 29. Sensor de temperatura y humedad HOBO MX2301

3.4.2 Bomba de calor geotérmica (BCG)

Para coleccionar la información de la bomba de calor se ocupó un PLC SIMATIC S7-1200 como el que se muestra en la ilustración 28, el registro de datos se hizo cada minuto durante la duración de la prueba. Los datos registrados fueron:

- Presión (alta y baja) [psi]
- Consumo energético [kVA]
- Temperatura de salida del ventilador



Ilustración 30. SIMATIC S7-1200 (WICONEX, 2023)

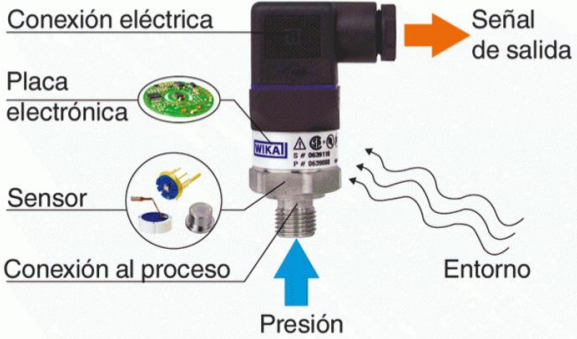


3.4.3 Circuito del agua (simulador de GHE)


Por parte del circuito de agua que tiene la función de simular un intercambiador geotérmico se registraron las variables:

- Temperatura de entrada del agua [°C]
- Temperatura de salida [°C]
- Flujo del agua $\left[\frac{L}{s}\right]$

De igual manera los datos fueron recabados cada minuto durante la prueba con ayuda del PLC anteriormente mencionado. Los instrumentos para medir las diferentes variables con ayuda del PLC fueron:

Tabla 20. Instrumentos de medición empelados durante las pruebas.

Variable	Instrumento	Ilustración
Presión	Transmisión de presión Omega de 600 psi	 <p>Conexión eléctrica → Señal de salida</p> <p>Placa electrónica</p> <p>Sensor</p> <p>Conexión al proceso</p> <p>Presión</p> <p>Entorno</p> <p><i>Ilustración 31. Diagrama de sensor de presión (Doria, 2023)</i></p>
Temperaturas	Sensor de temperatura RTD o termómetro de resistencia	 <p><i>Ilustración 32. Sensor RTD (Maloy, 2020)</i></p>
Flujo del agua	Sensor de efecto hall YF-B6	 <p><i>Ilustración 33. Sensor de flujo YF-B6 (direnc.net, 2023)</i></p>

Consumo eléctrico	Transmisores de corriente MFO series Omega	 <p data-bbox="833 653 1360 678"><i>Ilustración 34. Transmisores de corriente MFO-30</i></p>
-------------------	--	--

4 Resultados de pruebas

El objetivo en esta etapa es proporcionar una visión clara y concisa de los datos recopilados, las mediciones realizadas y los patrones identificados a lo largo de la investigación. Estos resultados no solo constituyen el núcleo de este trabajo, sino que también sirven como punto de referencia para las conclusiones que extraeremos más adelante en esta tesis.

Desde la eficiencia de sistemas específicos hasta la influencia de factores ambientales, los resultados proporcionan una visión completa de la compleja ecuación que es la refrigeración de espacios interiores. Estos datos, en última instancia, ayudarán a informar futuras decisiones de diseño y políticas relacionadas con la climatización de cuartos, en busca de un equilibrio entre el confort humano y la sostenibilidad energética.

El análisis de los datos obtenidos se divide en tres secciones:

- Datos del cuarto refrigerado
- Datos del equipo de BCG
- Datos del prototipo de GHE

Para los datos del cuarto refrigerado se obtuvieron los siguientes datos, estos se muestran a diferentes alturas como se explica en el capítulo 3. En el presente capítulo solo se mostrarán las gráficas con los datos recabados. El análisis se realizará más adelante.

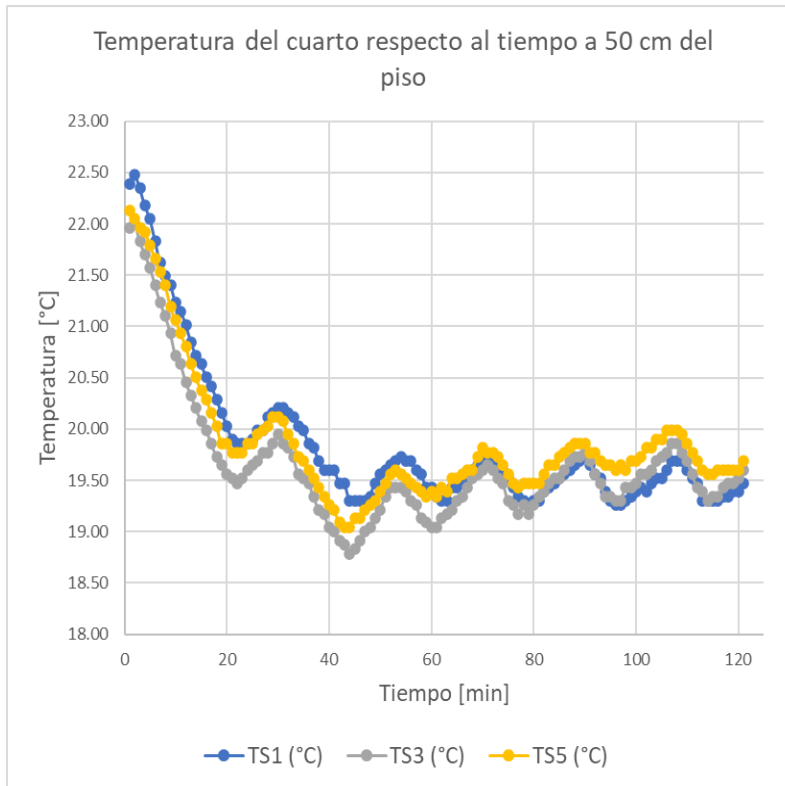


Ilustración 35. Comportamiento de temperatura a 50 cm del piso.

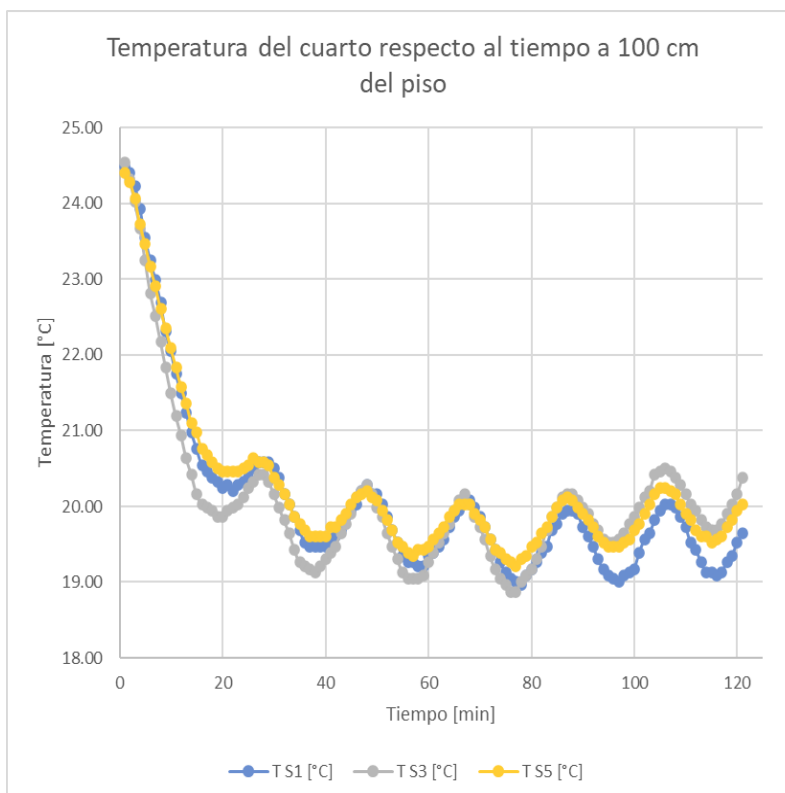


Ilustración 36. Comportamiento de temperatura a 100 cm del piso.

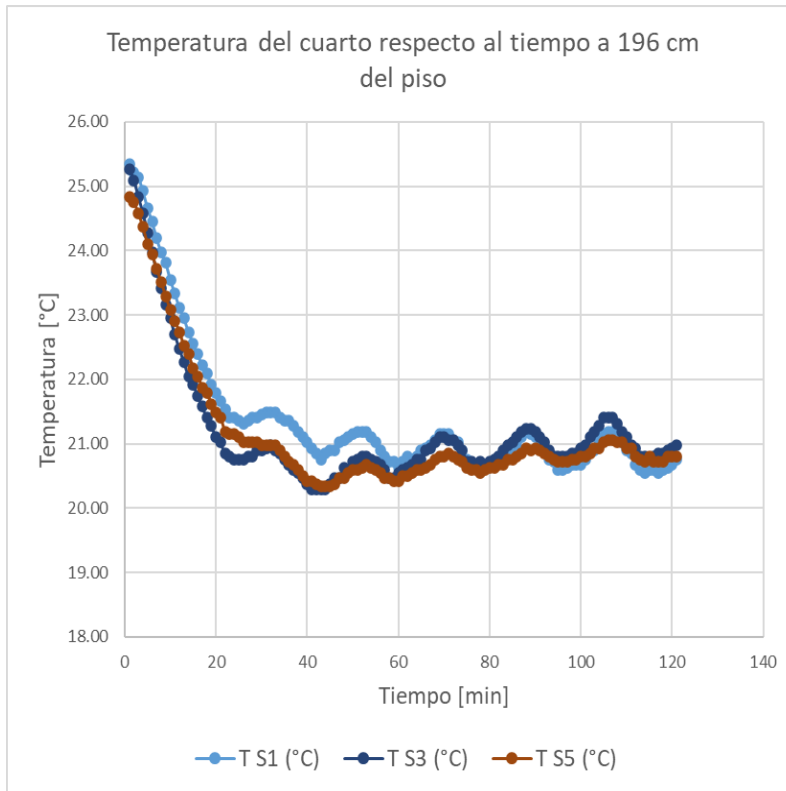


Ilustración 37. Comportamiento de temperatura a 196 cm del piso.

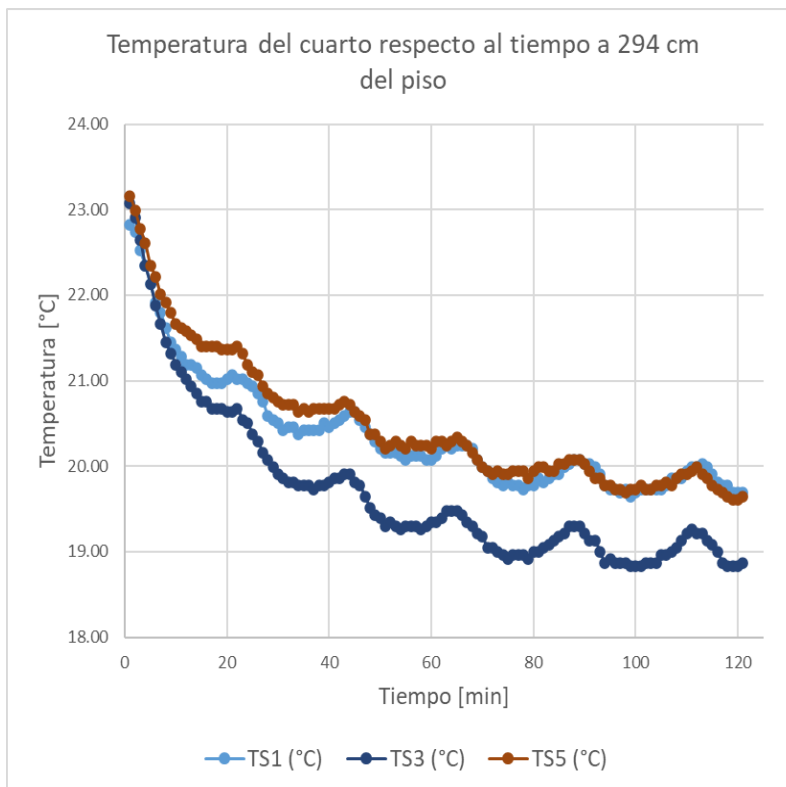


Ilustración 38. Comportamiento de temperatura a 294 cm del piso.

De los datos de funcionamiento del equipo son de interés las variables de las presiones, así como el consumo energético. El comportamiento de estas variables en todas las pruebas fue el mismo por lo que de manera general se muestra una gráfica para apreciar el funcionamiento del equipo.

Comportamiento de las presiones:

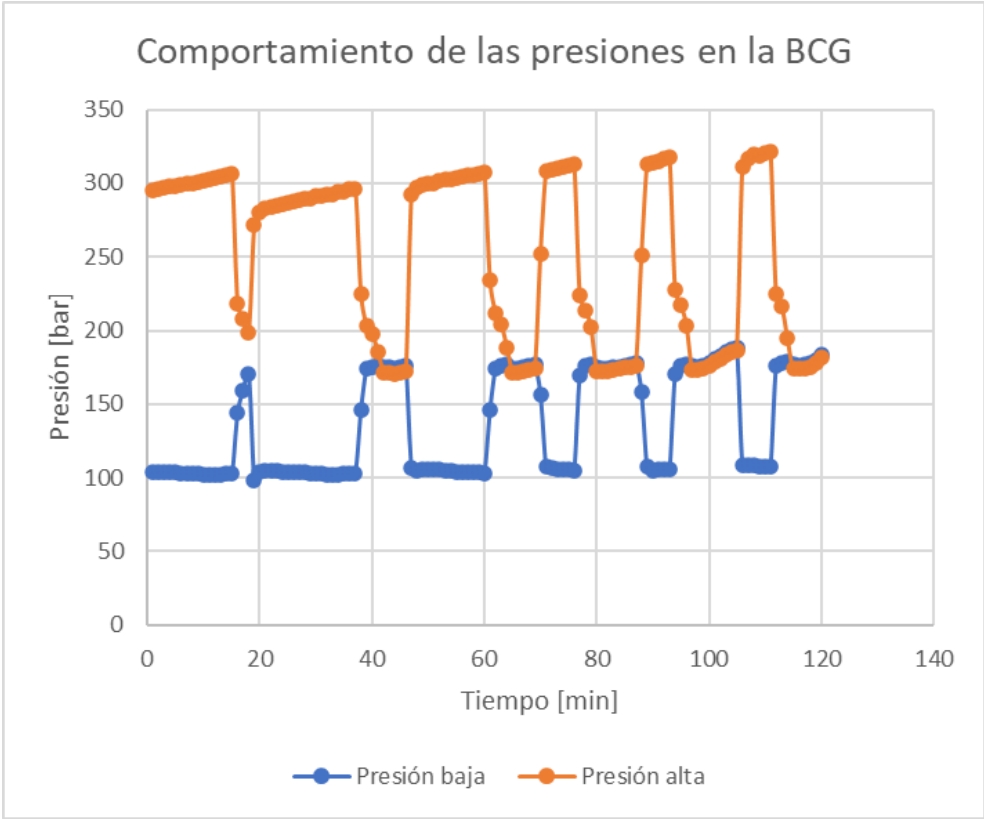


Ilustración 39. Comportamiento de las presiones en BCG.

Por parte del consumo energético se obtuvo el siguiente comportamiento.

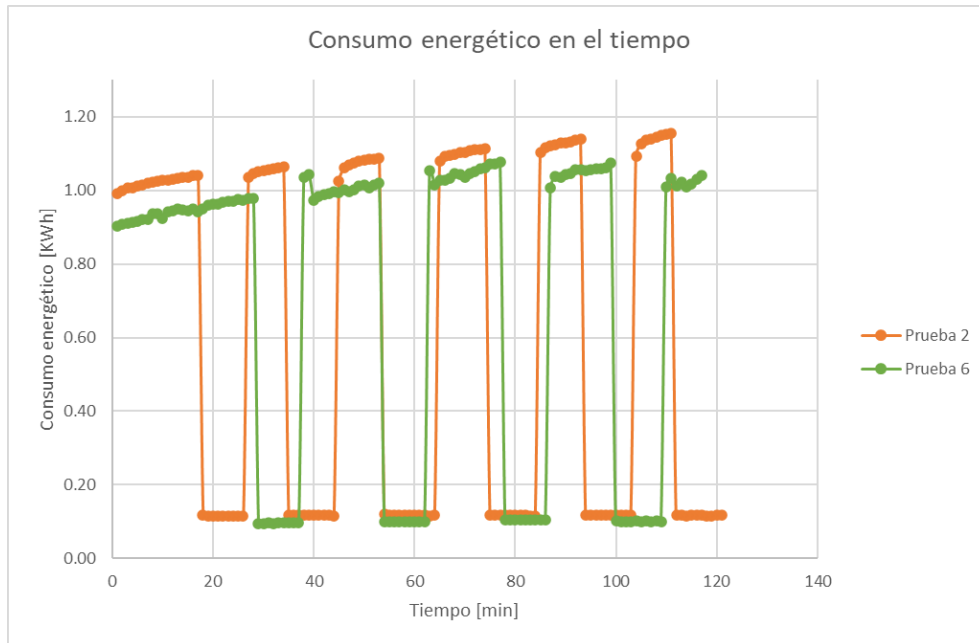


Ilustración 40. Consumo energético de BCG.

Finalmente, del modelo de sistema de GHE las variables importantes a considerar son la temperatura a la entrada y la salida de la BCG. Es importante observar el aumento de la temperatura con el tiempo dentro del sistema que se creó para simular un intercambiador de calor geotérmico.

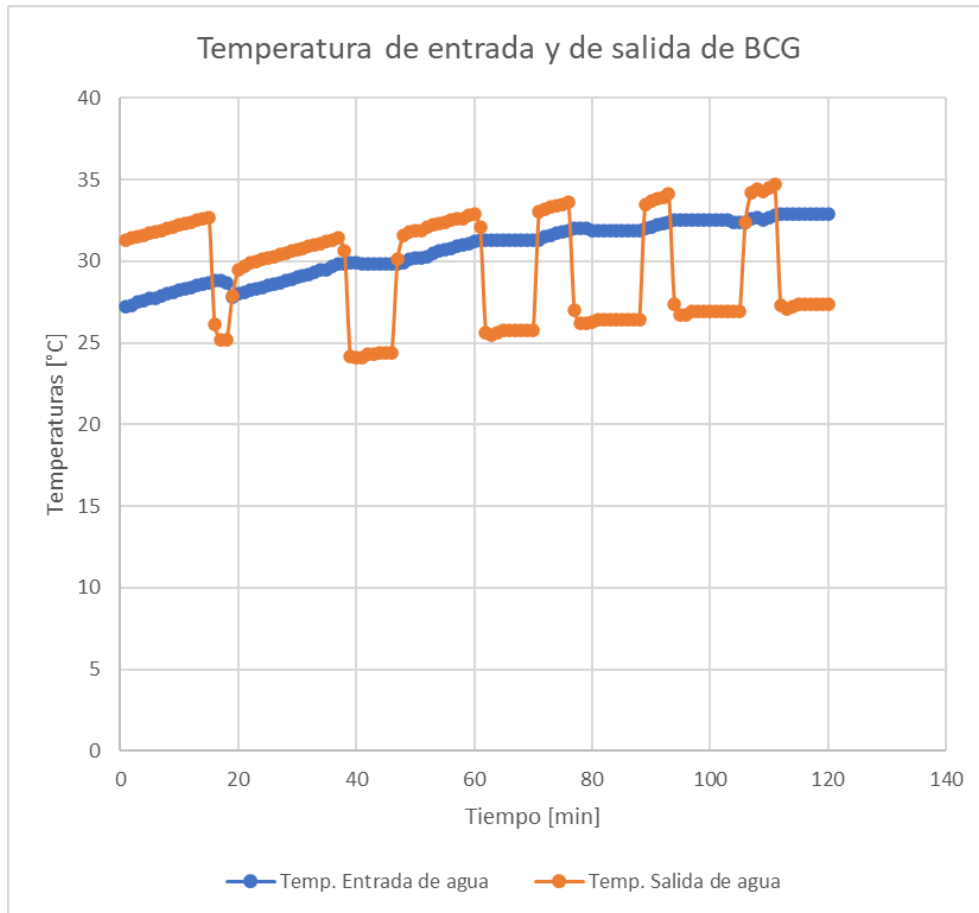


Ilustración 41. Temperaturas de entrada y salida del agua del sistema GHE.

4.1 Análisis de resultados

4.1.1 Análisis del cuarto refrigerado

En las gráficas mostradas se puede ver el comportamiento de la temperatura respecto al tiempo. Las temperaturas en el termostato se fijaron entre 19.5°C y 20°C.

En las gráficas se observa que el comportamiento es el mismo, sin embargo, se tienen pequeñas variaciones en las temperaturas registradas debido a su ubicación en el cuarto y también las actividades que se estuvieron realizando dentro del recinto durante la prueba. Estas variaciones no son grandes, haciendo una comparación de las temperaturas en cada instante con el promedio de las temperaturas registradas en cada prueba se obtiene un porcentaje de error menor al 5%.

Otro comportamiento que se observa es que conforme aumenta la altura de la posición de los sensores en el recinto, los datos de temperatura se dispersan más, esto debido al comportamiento turbulento que tiene el aire en la parte central de la habitación que ocasiona un efecto de estancamiento en la parte superior del cuarto, como consecuencia, el intercambio de energía es más lento y no

homogéneo (ver gráfica 38), la temperatura disminuye lentamente en comparación con las gráficas a menor altura. El efecto de celdas convectivas, como se observa en la ilustración 42, se debe a que al disminuir la temperatura del aire aumenta su densidad por lo que el aire caliente que se encuentra en el recinto buscará ascender siendo desplazado por el aire frío creando este fenómeno provocando que se mantenga una temperatura más constante en la parte media como se puede observar en las gráficas 35, 36 y 37.

Para el análisis de la distribución del aire es importante considerar la posición de la salida del aire, así como el difusor. Se tiene una descarga horizontal próxima al techo. De acuerdo con la caracterización de un difusor con características y posicionamiento similar al del caso presentado (ver Ilustración 42), “muestra una aplicación de salida de techo en la que el movimiento total del aire es contrarrestado por el aumento de la convección natural corrientes a lo largo de una pared perimetral calentada, en comparación con el descenso a lo largo de una pared interior más fría en el lado opuesto. Estas salidas descargan horizontalmente cerca del techo con una dispersión significativa, permitiendo que el aire más caliente del espacio se mezcle con el aire primario frío muy por encima de la zona ocupada. Por lo tanto, estas salidas son capaces de manejar cantidades relativamente grandes de aire a grandes diferencias de temperatura al tiempo que proporcionan aceptable niveles de movimiento del aire ambiente y uniformidad de temperatura en la zona ocupada.” (KRUEGER, 2024)

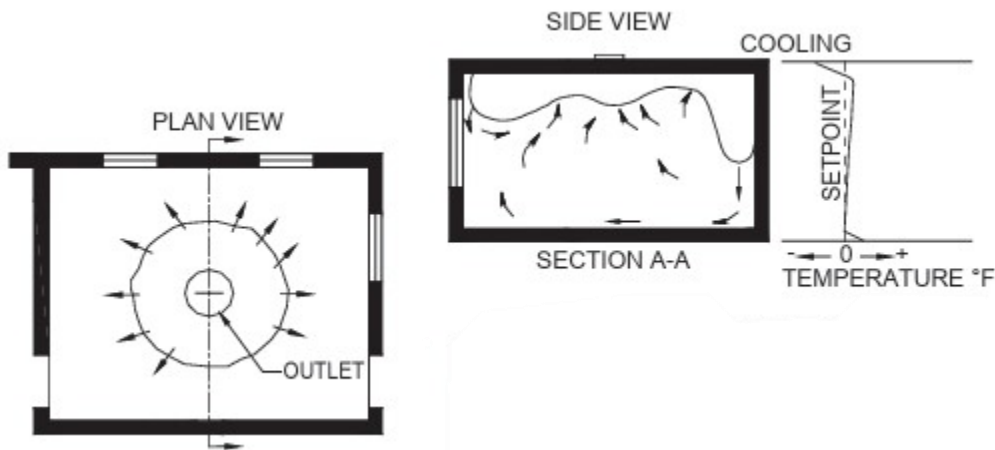


Ilustración 42. Características de distribución de aire con difusor de descarga horizontal. (KRUEGER, 2024)

Por otra parte, suponiendo que la salida del difusor provocara una descarga de aire vertical, se tiene el comportamiento mostrado en la figura 43, donde se aprecia que, para el caso de refrigeración, el aire total se proyecta verticalmente hacia el suelo y continúa a lo largo del suelo, dejando la zona de estancamiento cerca del techo, provocando una efecto similar al antes mencionados, con la diferencia de que el descenso del aire frío será por el centro del recinto y se tendrán celdas convectivas en los costados.

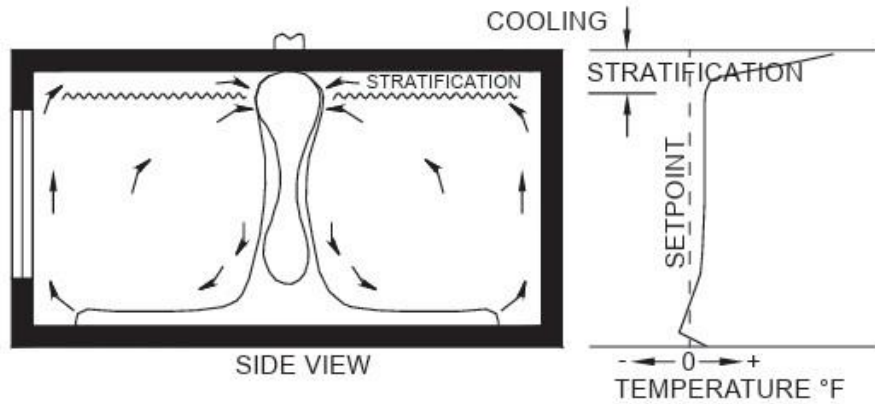


Ilustración 43. Características de distribución de aire con difusor de descarga vertical (KRUEGER, 2024)

Otro factor que puede tener influencia en las mediciones de las temperaturas a 294 cm de altura (vea la ilustración 38) es debido a las aberturas existentes en el techo. Se aisló en la medida de lo posible el cuarto, como se aprecia en el capítulo 3, para evitar grandes fugas térmicas. Sin embargo, hubo espacios en la parte alta del cuarto que no se pudieron cerrar debido a que son espacios de paso de la instalación eléctrica. Estas pequeñas áreas contribuían al intercambio de aire con el exterior. Al ser menor la temperatura del aire dentro del recinto, la densidad de este aumenta provocando el descenso del mismo, como consecuencia de esto se crea un área de baja presión en el techo que a su vez provoca el desplazamiento del aire del exterior (aire a temperatura ambiente) al interior, este con una mayor temperatura.

Utilizando el análisis que se hace mediante simulación computacional de dinámica de fluidos (CFD) comparando la distribución de aire con una cassette de 4 vías contra una ventilación de pared tradicional de AC. De este estudio se obtuvo que en todas las pruebas se tiene una mejor comportamiento la caseta de 4 vías dada una distribución uniforme en un cuarto cuadrado (Bamodu, Xia, & Tang, 2017)

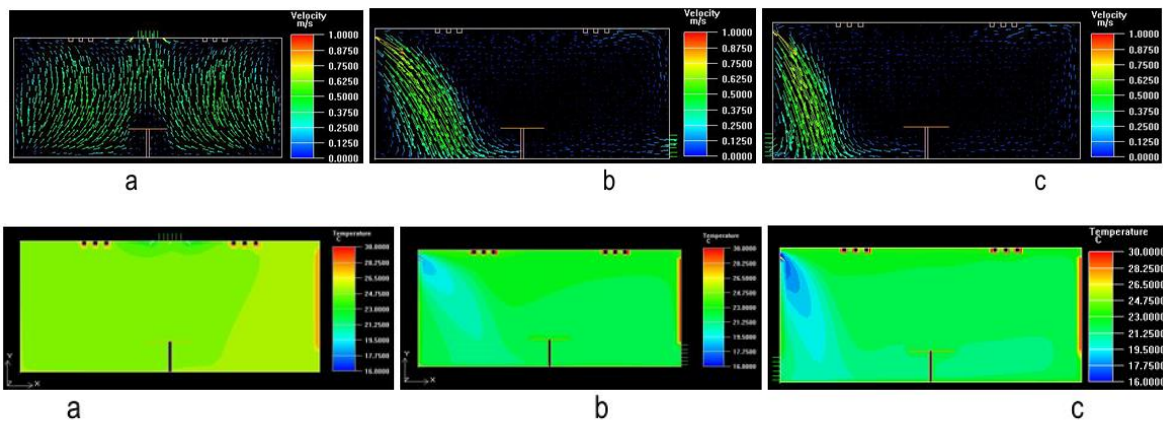


Ilustración 44. Patrón de velocidad y de temperatura en simulación de caseta de 4 vías y distribuidor de aire tradicional de pared de AC. (Bamodu, Xia, & Tang, 2017).

Considerando el difusor que se empleó para el desarrollo de esta tesis, así como su posición dentro del recinto, podríamos esperar tener una representación similar a la de la ilustración 44a donde se aprecia una distribución homogénea del aire.

4.1.2 Análisis de bomba de calor

Durante las pruebas la BCG mantuvo casi constantes las presiones. En promedio se obtuvieron las siguientes presiones de trabajo.

Tabla 21. Promedio de las presiones de trabajo de la BCG evaluada.

Baja presión	102 psi
Alta presión	299 psi

Relacionando el comportamiento de las presiones con las temperaturas de entrada del GHE podemos ver que conforme aumenta la temperatura del circuito del agua, también se afectan las presiones, estas aumentan proporcionalmente con las temperaturas, en la ilustración 45 podemos observar estos fenómenos durante una prueba.

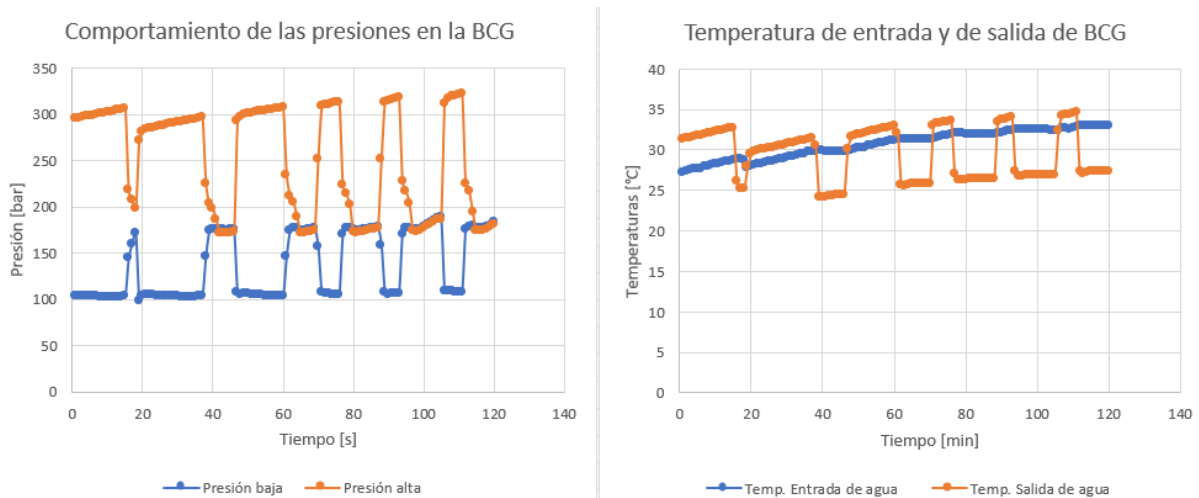


Ilustración 45. Comparación de variación de temperatura en GHE y presiones de BCG.

Por cuestiones de tiempo no se logró hacer un análisis comparativo entre un equipo de BCG y un A/C convencional, sin embargo, se tomaron como referencia los datos operativos que proporciona el proveedor para el equipo. La intención es tener un margen de comparación entre los parámetros ideales de operación según el proveedor y los obtenidos durante la prueba para así verificar que los parámetro de operación del equipo utilizado para el caso de estudio cumplen con lo que pudiera esperarse. Es cierto que, en un sentido estricto, debería haberse hecho dicha comparación, pero quedará para trabajos futuros.

A continuación se muestran los valores de operación proporcionados por el proveedor y los que se manejaron en las pruebas.

Tabla 22. Tabla de parámetros de trabajo obtenidas de proveedor y durante pruebas respectivamente.

Dato de operación	Proveedor	Prueba
Alta presión (psi)	278 - 455	299
Baja presión (psi)	134 - 160	102
Flujo de agua (L/s)	0.45 – 0.57	0.25 – 0.28

Los datos registrados durante la prueba no son los óptimos de operación para el equipo. Por una parte, se debe a que el circuito de GHE no tenía las dimensiones adecuadas ni los accesorios necesarios para permitir un mayor flujo de agua, esto impactando directamente en las presiones como se pudo observar en los resultados obtenidos al variar las temperaturas en el circuito de agua.

Por otra parte, la baja presión se encuentra por debajo del rango de operación. Para explicar el fenómeno de la baja presión se realizó una comparación entre el análisis energético con los datos que nos brinda el proveedor y los datos que se obtuvieron de la prueba.

Para el análisis se ocuparon los siguientes datos:

Tabla 23. Datos seleccionados para análisis energético de BCG

	Temperatura de entrada del agua	Flujo másico	Incremento de temperatura del agua	Cp del agua
Proveedor	24 °C	0.45 kg/s	11 °C	4.18 [kJ/kg °C]
Prueba	24 °C	0.25 kg/s	4°C	4.18 [kJ/kg °C]

Para conocer el flujo de calor se utiliza la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{Ec. 13})$$

Con los datos brindados del proveedor:

$$\dot{Q} = \left(0.45 \left[\frac{kg}{s}\right]\right) \cdot \left(4.18 \left[\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}\right]\right) \cdot (11[^\circ C]) = 20.69[kW]$$

Con los datos de las pruebas:

$$\dot{Q} = \left(0.25 \left[\frac{kg}{s}\right]\right) \cdot \left(4.18 \left[\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}\right]\right) \cdot (4[^\circ C]) = 4.18[kW]$$

A partir de la primera ley de la termodinámica, la cual podemos sintetizar con el viejo adagio “La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma”. Por lo que la energía que absorbe el sistema es la misma que se disipa. Se observa que existe una gran diferencia entre la energía que se transporta con los parámetros de operación óptimos y las condiciones de la prueba. Por esta razón, la baja presión se encuentra por debajo de los valores recomendados de operación, la energía absorbida no es suficiente para elevar la presión del vapor a los valores recomendados. Este fenómeno no se aprecia en la alta presión debido a que se produce el trabajo suficiente en el compresor para compensa y alcanzar la presión óptima de operación.

Por otra parte, tenemos el consumo energético representado en la ilustración 38. En promedio la BCG en funcionamiento consumió 1.03 [kWh]. De igual forma se aprecia un aumento en el consumo energético conforme aumenta la temperatura en el GHE por lo que esto demuestra la importancia en el cálculo e instalación del intercambiador geotérmico, si este no tiene un correcto funcionamiento de intercambio térmico, la BCG tendrá un mayor consumo energético. Es importante mencionar que durante las pruebas el ventilador todo el tiempo estuvo funcionando por esta razón en la gráfica se observa una disminución en el consumo, sin embargo, no es cero. Esto se puede corregir con la programación adecuada.

4.1.3 Análisis de GHE

El flujo en el GHE durante todas las pruebas fue de $0.268 \left[\frac{L}{s} \right]$, este flujo de agua es el responsable de transportar fuera del equipo el calor extraído del aire ambiente. Sin embargo, en la gráfica se observa que durante la prueba la temperatura de entrada de agua tiene una tendencia a calentarse conforme el tiempo avanza (ver Ilustración 41). En un caso ideal, la temperatura de entrada del agua debe permanecer constante ya que la función del GHE para el caso de refrigeración es de transferir el calor absorbido del aire al suelo (sumidero de calor). El sistema que pretendía sustituir el GHE durante las pruebas no disipaba de manera correcta el calor ocasionando que durante el funcionamiento del equipo el agua almacenada comience a calentarse gradualmente.

El punto anterior tiene una repercusión directa en la eficiencia del equipo (ver Ilustración 46). Si comparamos las gráficas podemos ver que conforme la temperatura de entrada del agua aumenta el consumo energético del equipo también. Esto se debe a que se requiere mayor trabajo del compresor para que el ciclo funcione de manera correcta, esto también explica el aumento de las presiones durante la prueba.

En la ilustración 41 vemos que la diferencia de temperaturas de entrada y salida del agua se mantienen proporcionales después del primer intervalo, por lo que se puede intuir que el intercambio de calor se hace de manera correcta y el aumento de la temperatura no tiene repercusiones en el intercambiador de placas (dispositivo de intercambio de calor de entre la BCG y GHE). Por otra parte, en el primer intervalo de funcionamiento del equipo se ve una mayor diferencia de temperatura del agua de entrada y de salida, esto debido a la mayor cantidad de energía que debe extraerse del aire ambiente en un principio para climatizar el espacio, los ciclos posteriores son más cortos en duración, la diferencia de temperaturas disminuye y se mantienen similares el resto de la prueba ya que no se requiere tanto trabajo del equipo como el inicial donde se puede decir que se tiene la temperatura máxima en el recinto y se tenía que extraer la mayor cantidad de energía térmica.

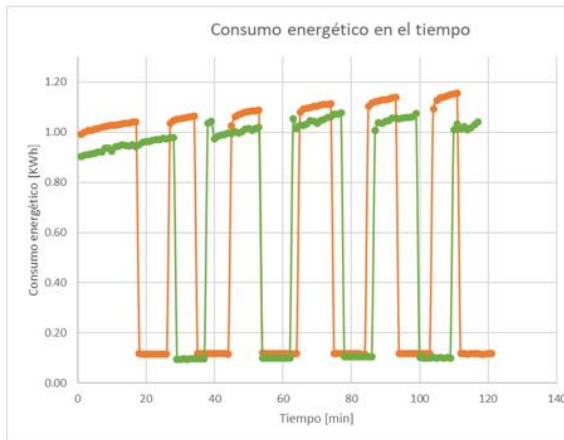


Ilustración 46. Comparación entre comportamiento de temperatura en GHE y consumo energético.

5 Conclusiones generales

Como conclusión de la investigación, la tecnología de BCG puede ayudar a el ahorro energético, que a su vez implica una disminución en la emisión de gases de efecto invernadero derivados de la electricidad (entre un 25% y un 50% menos de electricidad que los sistemas convencionales de calefacción y refrigeración), sin embargo, la solución no es completa en virtud de que requiere energía eléctrica para su funcionamiento, tan solo en la Unión Europea casi el 50% del consumo de energía final se utiliza para calefacción y refrigeración, como se expuso en la sección 1.2.

El objetivo principal del acondicionamiento de los espacios mencionados anteriormente se cumplió, a pesar de no tener un sistema adecuado de intercambiador de calor geotérmico, lo cual repercutió en un bajo rendimiento ya que solo estaba disponible por periodos cortos de tiempo. Por lo que se consideró que de haberse construido un sistema adecuado se podría tener un comportamiento más real e idóneo del sistema de refrigeración. Por otra parte, el hecho de que aumentara gradualmente la temperatura del GHE dejó en evidencia la interdependencia del fenómeno de transferencia de calor y el cambio de temperatura en el consumo energético y presiones de trabajo, entre otras funciones.

Para la toma de datos, lo ideal sería tener un mayor número de sensores que registren la temperatura y así tener un solo mapeo térmico del cuarto completo. Esto daría una mejor aproximación del comportamiento de la distribución del aire, sin embargo, los resultados obtenidos comparados con los de otros artículos se aproximan como se observó en el capítulo 4.1.

El análisis de cargas térmicas se hizo con referencia al manual de “Instalación de aire acondicionado” del Gobierno de México, en este se establece una fórmula para estimar una temperatura de confort, sin embargo, por cuestiones de tiempo, así como estaciones del año y situaciones meteorológicas, la temperatura

ambiente era muy aproximada a la temperatura de confort calculada, por lo que se tuvo que bajar más la temperatura establecida, entre 19.0 °C y 20 °C, también se escogieron estas temperaturas ya que ayuda en el proceso de fermentado de la cerveza del laboratorio. Dado que el equipo tenía una mayor capacidad de refrigeración a la que se necesitaba de acuerdo con los cálculos realizados, no se tuvo problema con esta consideración en las temperaturas de climatización.

Derivado de los resultados obtenidos, se surgiere el mejoramiento del sistema de GHE ya que no se tenía la correcta transferencia de energía térmica y el sistema implementado funcionó como un capacitor de energía, este se iba cargando conforme avanzaba el tiempo de pruebas y liberaba el calor muy lentamente. En cuestión de registro de datos, para trabajos futuros, se debe buscar el recabar la mayor información posible en una misma prueba para tener las condiciones iguales y no tener que seccionar las muestras en varios ensayos (ilustración 28) y así mitigar variabilidad de las que no se tienen control como el estado del tiempo.

Cabe mencionar que no se hizo un análisis estadístico debido a que el estudio es descriptivo, el trabajo se centró en la descripción detallada de un proceso específico para la bomba de calor, como estudio de caso. Y por otro lado la muestra que se logró generar era demasiado pequeña. Sin embargo, aun así, el estudio descriptivo proporcionó información valiosa. Finalmente con la intención de cotejar los resultados con los propios, se hizo una revisión de literatura, en donde los resultados reportados por los autores contienen su propio análisis estadístico.

En el ámbito de la dinámica de fluidos, se encontraron artículos que resultaron útiles para validar la información recabada por los sensores. Se compararon las diferentes mediciones puntuales obtenidas en cada prueba con los análisis de simulaciones de dinámica de fluidos realizados por diversos autores, quienes presentaban difusores y condiciones similares a las de este estudio. Muchos autores destacan un comportamiento de estancamiento en la parte superior de la habitación, debido a que las celdas convectivas generadas por las diferencias de temperatura y densidad provocan que el aire caliente se mantenga en la parte superior. Esto explica el comportamiento observado a 294 cm del piso, donde las mediciones fueron más dispersas y la detección de cambios de temperatura por parte de los sensores fue más lenta. En contraste, en el resto de las secciones se observó un comportamiento homogéneo debido al rápido intercambio de aire en la región de convección.

Finalmente, es importante recalcar la importancia de este tipo de trabajos dada la situación climática que se vive hoy en día y que se describe al principio de este documento. Hoy en día se están viviendo los meses más calurosos a escala global por lo que es una realidad que la climatización tomarán un papel muy importancia tanto para uso doméstico como industrial por lo que es importante tomar conciencia e implementar acciones que tengan el menor impacto ambiental posible, así como el mejor ahorro y funcionamiento energético de los equipos para no agudizar el problema.

6 Bibliografía

- Agencia AP y Fanny Miranda . (08 de Agosto de 2023). Científicos europeos declaran oficialmente julio como el mes más caluroso jamás registrado. *Milenio Internacional*.
- ANDIRA. (1 de Septiembre de 2023). *La climatización eficiente que demanda México*. Obtenido de ANDIRA : <https://www.andira.org.mx/2021/09/06/la-climatizacion-eficiente-que-demanda-mexico/>
- Bamodu, O., Xia, L., & Tang, L. (2017). A numerical simulation of air distribution in an office room ventilated by 4-way cassette air-conditioner. *Energy Procedia* , 2506-2511.
- Conuee. (2017). *Análisis de los consumos unitarios y estacionales por usuarios en tarifas residenciales entre 2012 y 2016 para identificar evolución de la demanda por aire acondicionado*. México: Sener.
- DAIKIN. (09 de Marzo de 2021). *Las bombas de calor: el futuro de la calefacción sostenible*. Obtenido de Blog Daikin: https://www.daikin.es/es_es/blog-daikin/las-bombas-de-calor-el-futuro-de-la-calefaccion-sostenible.html
- DAIKIN. (21 de Abril de 2022). *¿Por qué está creciendo el mercado de las bombas de calor en toda Europa?* Obtenido de Blog DAIKIN: https://www.daikin.es/es_es/blog-daikin/el-mercado-de-la-bomba-de-calor-crece-en-toda-europa.html
- direnc.net. (4 de Octubre de 2023). *Water Flow Sensor YF-B6*. Obtenido de direnc.net: <https://www.direnc.net/su-akis-sensoru-yf-b6-en>
- Doria, S. (4 de Octubre de 2023). *¿Cómo funciona un transmisor de presión?* Obtenido de WIKA: <https://www.bloginstrumentacion.com/productos/como-funciona-un-transmisor-de-presion/>
- GLASSFIBER. (2023). *Ficha Técnica GF-GFLEX*. Ciudad de México.
- Google . (25 de Septiembre de 2023). *Google Maps*. Obtenido de Google Maps: <https://www.google.com/maps>
- Grassi, W. (2018). *Heat Pumps Fundamentals and Applications*. Italy: Springer.
- Hernández Goribar, E. (2017). *Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración*. México: Limusa.
- Ibargüengoitia, D. (30 de Agosto de 2018). *Industria del aire acondicionado en México crece el 7% anual*. Obtenido de PULSO PYME: <https://pulsopyme.com/industria-del-aire-acondicionado-en-mexico-crece-el-7-anual/>
- Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa. (27 de Mayo de 2022). *Normatividad Técnica* . Obtenido de Gobierno de México: https://www.inifed.gob.mx/doc/pdf/2022/normatividad/VOLUMEN_5_TOMO_III_AIRE_ACONDICIONADO_2022.pdf

- Intergovernmental Panel On Climate Change. (2023). *Climate Change 2023 Synthesis Report* . Switzerland : IPCC.
- KRUEGER. (13 de Enero de 2024). *Air Distribution Engineering*. Obtenido de Krueger: www.krueger-hvac.com
- Lucas-Bartolo, N. (28 de Junio de 2023). Altas temperaturas en México calientan las ventas de equipos de aire acondicionado . *El Economista* .
- Lund, J., & Toth, A. (2020). Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. *Proceedings World Geothermal Congress 2020*.
- Maloy, S. (30 de Junio de 2020). *Cómo medir la temperatura con sensores RTD* . Obtenido de DEWESoft: <https://dewesoft.com/es/blog/medir-temperatura-con-sensores-rtd>
- Monschauer, Y., Delmastro, C., & Martinez-Gordon, R. (31 de Marzo de 2023). *Global heat pump sales continue double-digit growth*. Obtenido de iea.org: <https://www.iea.org/commentaries/global-heat-pump-sales-continue-double-digit-growth>
- Noticias ONU. (17 de Julio de 2020). *Un aire acondicionado más eficiente puede ahorrar 8 años de emisiones mundiales de gases de efecto invernadero*. Obtenido de Noticias ONU: <https://news.un.org/es/story/2020/07/1477651>
- OVACEN. (27 de Septiembre de 2023). *Energía geotérmica* . Obtenido de OVACEN: <https://ovacen.com/energias-renovables/geotermica/>
- Paz, R. (3 de Agosto de 2023). "La era de la ebullición global ha llegado". *GacetaUNAM*.
- Prol-Ledesma, R. M. (2002). *El calor de la Tierra*. México: Fondo de Cultura Económica .
- Rabiul, M., Kumar, N., & Rahman, S. (2018). *Renewable Energy and the Environment* . Singapore : Springer .
- Salamanca, F. (2011). Aire acondicionado y clima urbano. *El Ecologista* , 49-50.
- Sanchez Guzmán, J., Sanz López, L., & Ocaña Robles, L. (2011). *Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020*. Madrid: IDAE.
- Secretaría de Educación Pública. (2022). *NORMAS Y ESPECIFICACIONES PARA ESTUDIOS, PROYECTOS, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIONES*. México: INIFED.
- WICONEX. (03 de Octubre de 2023). *Controladores Básicos SIMATIC S7-1200*. Obtenido de WICONEX: <https://www.wiconex.com/servicios/controladores-basicos-simatic-s7-1200/>
- Wu, R. (2009). Energy Efficiency Technologies - Air Source Heat Pump vs. Ground Source Heat Pump. *Journal of Sustainable Development*, 18.

