

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA



ESTUDIO DEL POTENCIAL DEL SUBSUELO COMO SUMIDERO DE CALOR PARA EL
SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO TERMOSOLAR DE LA ESCUELA DE
PUERTECITOS, ENSENADA B.C.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

JUAN RÍOS ARRIOLA

DIRECTORES:

DR. NICOLÁS VELÁZQUEZ LIMÓN

DR. ALEXIS ACUÑA RAMÍREZ

DR. EFRAÍN GÓMEZ ARIAS

Mexicali, B.C., México a 21 de junio de 2021.

**EL SIGUIENTE PROYECTO FUE DESARROLLADO EN
EL CENTRO DE ESTUDIO DE LAS ENERGÍAS
RENOVABLES.**



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Dr. Nicolás Velázquez Limón por abrirme las puertas del Centro de Estudio de las Energías Renovables. Por establecer un gradiente de conocimiento conmigo, cediendo una gran cantidad de conocimientos técnicos y personales, que, sin duda, han sido de gran valor y utilidad para mi desarrollo profesional y humano.

Al Dr. Efraín Gómez Arias, por introducirme al mundo de la investigación y guiarme durante mis primeros pasos. Por la confianza depositada en mi cuando mi experiencia era nula. Por su amistad, apoyo, consejos y tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

Al Dr. Alexis Acuña por su apoyo y orientación en mis inicios dentro del área de la geotermia de baja entalpía, y por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

A mis compañeros del CEENER; Armando, Saúl, Ricardo, Cristian y Ernesto. Por su apoyo moral y técnico en cada una de las etapas que conformaron este estudio de Maestría. Por hacerme sentir como en casa desde el día cero. Existe un gran aporte de cada uno de ustedes dentro de esta tesis. Los admiro y estimo mucho. Gracias totales.

A mi familia en Ensenada, por apoyarme en todas mis decisiones. Que, a pesar de la distancia, se hacen sentir. Que sembraron en mi la semilla de la honradez y el trabajo.

A mi familia en Mexicali, especialmente a mi tía Gloria Lizaola por ser el gran soporte de este investigador, sin duda, sin su desinteresado apoyo este logro no sería posible. Por abrirme las puertas de su casa desde mi llegada a Mexicali. Por las pláticas de largas horas que siempre terminaban con una conclusión/enseñanza valiosa. Siempre conmigo.

A todo el personal del Instituto de Ingeniería, por su calidez y calidad humana. Especialmente al Dr. Jaime Alonso Reyes López, por todo el apoyo y el aprendizaje en el área de la caracterización de suelos. A la Dra. Eliana Rodríguez Burgueño por su tiempo dedicado a la construcción y revisión de la parte inicial de esta tesis de Maestría.

Al Dr. Gonzalo Bojórquez Morales por su apoyo técnico para llevar a cabo el registro de temperatura en el subsuelo de Mexicali y Puertecitos. Al Dr. Aníbal Luna León por su apoyo técnico en la herramienta computacional para simulación térmica de edificaciones. Por ambos ayudarme sin conocerme. Gracias totales.

DEDICATORIA

Dedicado a mi familia; a mi abuelo Juan Ríos Pérez por ser todo, a mi abuela Ana Luisa Arriola por el inmenso cariño y la fuerza que me transmite, a mi Padre Juan Ramón Ríos por sus valiosas enseñanzas de vida, a mi hermano Omar Gabriel Ríos que hoy se encuentra inmerso en el mundo de la ingeniería, a mi hermana Anamary Ríos por motivarme a ser cada día mejor, a mi hermana Ana Luisa Ríos y sus hijos por ser una fuente de motivación inmensa, a mi tía Gloria Lizaola por todo el apoyo y cariño recibido.

RESUMEN

Los sistemas de enfriamiento por absorción son una alternativa para disminuir el alto consumo de energía eléctrica destinado para acondicionamiento de aire (A/C) en edificaciones. Su flexibilidad para activarse con diferentes fuentes de energía térmica vuelve atractiva su implementación en lugares sin acceso a la red de energía eléctrica con potencial de aprovechamiento de energías renovables, como solar, geotérmica y/o biomasa. Existen diferentes factores que han limitado la amplia utilización de este tipo de sistemas como; alta inversión inicial, baja eficiencia, y en ocasiones otro tipo de limitantes operativas relacionadas con las condiciones del sitio de instalación. La presente investigación estudia de manera teórico-experimental la integración de intercambiadores de calor geotérmicos a un sistema de enfriamiento por absorción instalado en la escuela del poblado Puertecitos, BC, México, con la finalidad de reducir su consumo de agua potable y energía eléctrica. Se utilizó el software TRNSYS para simular el comportamiento del sistema propuesto bajo diferentes modos de operación, utilizando datos experimentales medidos en sitio de la variación de las condiciones meteorológicas y la temperatura del subsuelo, también se validaron los modelos numéricos utilizados. Los intercambiadores de calor geotérmicos propuestos logran reducir 848 kWh de enfriamiento a las aulas que representan 5.3% de la carga térmica anual, lo cual se ve reflejado en una disminución de 818.3 kWh de calor auxiliar para activación que representan el 19.9% del total anual. También evitan el consumo de 8094 kg de agua que representan el 23.8 % del consumo anual. Se concluyó que además de reducir la carga térmica de las aulas y el consumo de calor auxiliar para activar el enfriador, la integración de intercambiadores de calor geotérmicos permite alcanzar condiciones de confort (25 °C) cuando la demanda térmica de las aulas es mayor en comparación con la capacidad nominal del enfriador por absorción. Los intercambiadores de calor geotérmicos propuestos tienen mayor capacidad para evitar el consumo de agua en comparación con la reducción de carga térmica obtenida. Para realizar estudios sobre intercambiadores de calor geotérmicos es recomendable realizar mediciones de temperatura del subsuelo en sitio, principalmente cuando se trata de una zona volcánica y/o con manifestaciones hidrotermales que pudieran tener influencia a poca profundidad.

ABSTRACT

Absorption cooling systems are an alternative to reduce the high consumption of electrical energy for air conditioning (A/C) in buildings. Their ability to be activated with different thermal energy sources makes their implementation attractive in places without access to the electrical grid. There are different factors that have limited the wide use of this type of systems such as; high initial investment, low efficiency, and sometimes other operational limitations related to the conditions of the installation site. The present research studies in a theoretical-experimental way the integration of geothermal heat exchangers to an absorption cooling system installed in a school in the remote town of Puertecitos, BC, Mexico, with the purpose of reducing its consumption of potable water and electric energy. TRNSYS software was used to simulate the behavior of the proposed system under different operation modes, using experimental data measured on site of the meteorological conditions and soil temperature, also the numerical models used were validated. The proposed geothermal heat exchangers achieve a reduction of 848 kWh of cooling to the classrooms, representing 5.3% of the annual thermal load, which is reflected in a reduction of 818.3 kWh of auxiliary heat for chiller activation, representing 19.9% of the total annual consumption. They also avoid the consumption of 8094 kg of water, representing 23.8% of the total annual consumption. It was concluded that in addition to reducing the thermal load of the classrooms and the consumption of auxiliary heat to activate the chiller, the integration of geothermal heat exchangers allows reaching comfort conditions (25 °C) when the thermal load of the classrooms is higher compared to the rated capacity of the absorption chiller. The proposed geothermal heat exchangers have a higher capacity to avoid water consumption compared to the thermal load reduction obtained. To carry out studies on the feasibility of geothermal heat exchangers, it is advisable to measure on site soil temperature, especially when it is a volcanic area and/or with hydrothermal manifestations that could have influence at shallow depths.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1.- Problemática y Justificación | 2 |
| 1.2.- Antecedentes | 5 |
| 1.3. Hipótesis..... | 14 |
| 1.4 Objetivo general | 14 |
| 1.5 Objetivos específicos | 14 |
| 1.6.- Descripción general de la tesis..... | 15 |
| CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS DE LA GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA | 16 |
| 2.1.- Geotermia de baja entalpía | 16 |
| 2.2.- Usos directos de la geotermia de baja entalpía | 17 |
| 2.3- El subsuelo como fuente/sumidero de calor | 19 |
| 2.4 Intercambiadores de calor geotérmicos..... | 22 |
| 2.5 Sistemas de enfriamiento por absorción | 25 |
| 2.6 Descripción física y limitantes operativas del SAATEP..... | 29 |
| CAPÍTULO 3: ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA | 32 |
| 3.1 Descripción de la propuesta tecnológica..... | 32 |
| 3.2 Intercambiador de calor tierra-aire..... | 32 |
| 3.3 Intercambiador de calor tierra-agua | 34 |
| 3.4 SAATEP con rechazo de calor geotérmico..... | 35 |
| 3.5 Metodología para simulación de la propuesta tecnológica | 37 |
| 3.6 Caracterización del subsuelo..... | 38 |
| 3.6.1 Análisis de textura..... | 41 |
| 3.6.2 Contenido de humedad por gravimetría..... | 42 |
| 3.6.3 Propiedades termo físicas del subsuelo..... | 42 |
| 3.6.4 Perfil de temperatura del subsuelo | 43 |
| 3.7 Condiciones meteorológicas | 45 |

| | |
|---|-----------|
| 3.8 Análisis de la edificación | 46 |
| 3.8.1 Aulas escuela Puertecitos | 47 |
| 3.9 Simulación de intercambiadores de calor geotérmicos | 50 |
| 3.9.1 Estudio Paramétrico de Intercambiadores de calor geotérmicos | 51 |
| 3.9.2 Estudio Operativo de Intercambiadores de calor geotérmicos..... | 51 |
| CAPÍTULO 4: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | 52 |
| 4.1 Validación experimental | 52 |
| 4.1.1 Validación del perfil de temperatura del subsuelo..... | 52 |
| 4.1.2 Validación del modelo de intercambiadores de calor geotérmicos..... | 54 |
| 4.2 Características del subsuelo | 56 |
| 4.2.1 Análisis de textura..... | 56 |
| 4.2.2 Contenido de humedad..... | 57 |
| 4.2.3 Propiedades termo físicas del suelo | 58 |
| 4.2.4 Perfil de temperatura del subsuelo | 59 |
| 4.3 Condiciones meteorológicas del sitio de estudio | 62 |
| 4.3.1 Temperatura ambiente..... | 62 |
| 4.3.2 Radiación solar..... | 63 |
| 4.3.3 Velocidad de viento..... | 64 |
| 4.3.4 Humedad relativa | 65 |
| 4.4 Análisis de la edificación | 66 |
| 4.5 Estudio de intercambiadores de calor geotérmicos..... | 68 |
| 4.5.1 Estudio paramétrico de intercambiador de calor tierra-aire | 68 |
| 4.5.2 Estudio paramétrico de intercambiador de calor tierra-agua | 71 |
| 4.5.3 Estudio operativo de intercambiador de calor tierra-aire | 74 |
| 4.5.4 Estudio operativo de intercambiador de calor tierra-agua | 83 |
| 4.6 Conclusiones | 86 |
| REFERENCIAS:..... | 88 |
| Anexo 1: Fichas técnicas..... | 93 |

INDICÉ DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.- Intercambiador de calor tierra-aire..... | 7 |
| Figura 2.- Instalación de EAHE (Modificado de Singh y Singh, 2015)..... | 9 |
| Figura 3. Bomba de calor geotérmica tipo horizontal de circuito cerrado..... | 10 |
| Figura 4. A/C tipo Split modificado para condensar en el subsuelo (Permchart & Tanatvanit, 2009). | 11 |
| Figura 5.- Intercambiadores de calor geotérmicos como condensador en sistemas de A/C..... | 12 |
| Figura 6. Gradiente térmico normal (a) Gradiente térmico anómalo (b)..... | 17 |
| Figura 7. Distribución de usos directos de la geotermia en el mundo. | 18 |
| Figura 8. Variación diaria de la temperatura del subsuelo. Singh & Sharma,(2017). | 20 |
| Figura 9.Variación anual de la temperatura del subsuelo. Acuña et al., (2017). | 21 |
| Figura 10. Diseños comunes de GHE: (a) tubo en U simple, (b) tubo en U doble, (c) coaxial simple, (d) coaxial complejo, (e) bucles deslizantes superpuestos, (f) vertical bucles en espiral. (Aresti et al., 2018) | 22 |
| Figura 11. Ciclo de compresión mecánica (a) y de absorción de simple efecto (b). (Vereda Ortiz, 2015)..... | 25 |
| Figura 12. Sistema de A/C termosolar de la escuela de Puertecitos a). Subsistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica, b). Torre de enfriamiento y c). Unidad de enfriamiento por absorción. (J.A. Aguilar-Jiménez et al., 2020)..... | 29 |
| Figura 13. Configuración actual del SAATEP. | 30 |
| Figura 14. Diagrama del Subsistema de agua fría con EAHE en aulas..... | 33 |
| Figura 15. Diagrama del Subsistema de agua de enfriamiento con EWHE en aulas. | 34 |
| Figura 16. Diagrama de la propuesta tecnológica..... | 35 |
| Figura 17. Área ocupada por la propuesta tecnológica (vista aérea).FUENTE: Google Earth. ... | 36 |
| Figura 18. Diagrama de flujo de la metodología para el estudio operativo en TRNSYS..... | 37 |
| Figura 19. a) Perforación manual de pozo vertical (4 m) b) Muestras de suelo recuperadas durante la perforación. | 38 |
| Figura 20. Cambio de coloración y textura de muestras de suelo recuperadas en pozo vertical Puertecitos..... | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 21. Sonda con sensores de temperatura para monitoreo en el subsuelo de Puertecitos. ... | 40 |
| Figura 22. Sondas de temperatura con cabezal. | 40 |
| Figura 23. a) Colocación del adquisidor de datos en el cuarto de control del SAATEP. b) Adquisidor de datos puesto en marcha. | 41 |
| Figura 24. Variación de la temperatura ambiente. | 44 |
| Figura 25. Estación meteorológica modelo Davis Vantage Pro. | 45 |
| Figura 26. Aulas para Primaria en escuela Puertecitos. | 47 |
| Figura 27. Vista aérea de aulas en escuela Puertecitos. | 48 |
| Figura 28. Aula de Preescolar en escuela Puertecitos. | 48 |
| Figura 29. Validación experimental de la temperatura del subsuelo en TRNSYS. | 53 |
| Figura 30. Configuración experimental del EAHE estudiado por Bansal et al., 2012. | 54 |
| Figura 31. Validación del perfil de temperatura en el EAHE simulado contra experimental. | 55 |
| Figura 32. Triangulo de textura para muestras de suelo. | 56 |
| Figura 33. Perfil teórico de temperatura del subsuelo en Puertecitos. | 60 |
| Figura 34. Perfil experimental de temperatura del subsuelo en Puertecitos. | 61 |
| Figura 35. Promedios mensuales de temperatura ambiente en Puertecitos. | 62 |
| Figura 36. Promedios mensuales de radiación solar en Puertecitos. | 63 |
| Figura 37. Velocidad de viento en Puertecitos. | 64 |
| Figura 38. Humedad relativa en Puertecitos. | 65 |
| Figura 39. Variación anual de temperatura interior en el aula de la escuela Puertecitos. | 66 |
| Figura 40. Variación de diámetros y flujos ($L=50$ m y $z=4$ m). | 68 |
| Figura 41. Variación de longitudes y profundidades ($\Phi=6$ in, $\dot{m}=750$ kg/h). | 69 |
| Figura 42. Variación de número de pozos y profundidad. | 71 |
| Figura 43. Separación entre pozos y diámetro de perforación. | 72 |
| Figura 44. Dinámica térmica del aula durante la semana crítica del periodo mayo-junio. | 74 |
| Figura 45. Comportamiento del SCAES durante la semana crítica del primer periodo cálido. ... | 75 |
| Figura 46. Dinámica térmica del aula durante la semana crítica del periodo agosto-octubre. | 76 |
| Figura 47. Comportamiento del SCAES durante la semana cálida del primer periodo de enfriamiento. | 77 |
| Figura 48. Comportamiento térmico del aula durante el mes de enero. | 79 |
| Figura 49. Comportamiento térmico del aula durante el mes de diciembre. | 81 |

| | |
|---|----|
| Figura 50. Comportamiento del subsistema de agua de enfriamiento durante la semana crítica del primer periodo cálido..... | 83 |
| Figura 51. Comportamiento del subsistema de agua de enfriamiento en la semana crítica del segundo periodo cálido. | 84 |

INDICÉ DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Usos directos de la geotermia en México. (Gutiérrez-Negrín et al., 2020) | 19 |
| Tabla 2. Características constitutivas de los muros del aula de la escuela Puertecitos. | 49 |
| Tabla 3. Calibración de sensores de temperatura y adquisidor de datos. | 53 |
| Tabla 4. Contenido de humedad en muestras de pozo en escuela de Puertecitos..... | 57 |
| Tabla 5. Propiedades termo físicas de muestras de suelo Puertecitos. | 58 |
| Tabla 6. Variación de disipación de calor semanal con diferentes diámetros. | 69 |
| Tabla 7. Variación de disipación de calor semanal con diferentes longitudes. | 70 |
| Tabla 8. Disipación de calor con diferente número de pozos y profundidad. | 72 |
| Tabla 9. Variación de disipación de calor semanal con diferentes longitudes. | 73 |
| Tabla 10. Ahorro de carga térmica generado por el EAHE..... | 78 |
| Tabla 11. Ahorro de calor auxiliar generado por el EAHE. | 78 |
| Tabla 12. Adición de calor al aula por parte del EAHE en modo calefacción. | 82 |
| Tabla 13. Ahorro de agua evaporada generado por el EWHE..... | 85 |

Acrónimos

A/C: Aire acondicionado.

ASHRAE: American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers.

ASTM: American Society of Testing Materials.

BCG: Bomba de calor geotérmica.

CFE: Comisión Federal de Electricidad.

COP: Coefficient of Performance (Coeficiente de desempeño).

DOE: Department of Energy.

EAHE: Earth to Air Heat Exchanger (Intercambiador de calor tierra-aire).

EPW: Energy Plus Weatherfile.

EWHE: Earth to Water Heat Exchanger (Intercambiador de calor tierra-agua).

GHE: Geothermal Heat Exchanger.

GSHP: Ground Source Heat Pump (Bomba de calor geotérmica).

NREL: National Renewable Energy Laboratory

NP: Número de pozos.

PVC: Policloruro de Vinilo

SAATEP: Sistema de Aire Acondicionado Termosolar de la escuela de Puertecitos.

SCAES: Subsistema de Captación y Almacenamiento de Energía Solar

Tonr: Tonelada de refrigeración.

TRNSYS: Transient Simulation Studio.

TRT: Thermal Response Test (Test de respuesta térmica).

USD: United States Dollar.

Nomenclatura

A_0 = Amplitud de temperatura ambiente.

α =Difusividad térmica.

α_0 = Difusividad térmica correspondiente a ese tipo de suelo sin humedad.

b = Constante dependiente del tipo de suelo.

C_p =Calor específico.

ρ =Densidad.

d =Profundidad de amortiguamiento.

k = Conductividad térmica.

γ = Diferencia entre la máxima difusividad térmica a un contenido de humedad y la difusividad sin contenido de humedad.

θ_0 =Difusividad sin contenido de humedad.

P = Periodo.

$T_{(z,t)}$ = Temperatura del subsuelo.

T_m =Temperatura media del ambiente.

t =Tiempo.

t_0 =Tiempo de menor temperatura.

Φ =Diámetro.

z =Profundidad.

ω =Frecuencia de la onda de temperatura.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La comunidad de Puertecitos perteneciente al municipio de Ensenada, Baja California, México ($30^{\circ}21'19.7''$ N y $114^{\circ}38'26.3''$ O) es un pueblo pesquero con alto grado de marginación social (CONAPO, 2010) ubicado en la franja costera del Golfo de California. Su población es de 40 habitantes (INEGI, 2010) y no cuenta con acceso a la red nacional de transmisión de energía eléctrica debido a su lejanía de la zona urbana.

El clima predominante es muy seco, muy cálido (García, 2004) y presenta una temperatura media anual de 25°C . Durante los meses de verano la temperatura ambiente en la localidad puede alcanzar niveles cercanos a 45°C , haciendo evidente la necesidad de aire acondicionado (A/C) para obtener confort térmico en las edificaciones de la localidad.

Los habitantes de Puertecitos utilizan una micro-red de generación solar-eólica con sistema de almacenamiento, que permite satisfacer necesidades como; A/C y preservación de alimentos (Aguilar-Jiménez et al., 2018). La escuela del poblado cuenta con un sistema de aire acondicionado por absorción termosolar (SAATEP) con capacidad de 35 kW, diseñado para satisfacer las necesidades de enfriamiento de cuatro aulas (Aguilar-Jiménez et al., 2019).

El uso de tecnología no convencional como el enfriamiento por absorción para satisfacer necesidades de A/C presenta ventajas con respecto a sistemas convencionales (compresión mecánica de vapor), como ausencia de fluidos refrigerantes contaminantes y menor consumo de energía eléctrica. Sin embargo, la operación del sistema de A/C termosolar de la escuela de Puertecitos ha sido limitada por factores relacionados con la baja disponibilidad de agua potable y energía eléctrica en el poblado. Aunque se vislumbra que esta tecnología es atractiva por los niveles de radiación solar en la zona, es importante realizar modificaciones al SAATEP con la finalidad de reducir su consumo de agua potable y energía eléctrica.

1.1.- Problemática y Justificación

El uso de sistemas de A/C para climatización de edificaciones representa el 20% del consumo mundial de energía eléctrica (IEA, 2018). El aumento de temperatura en el planeta ha provocado que algunas zonas se vuelvan más cálidas y/o desérticas (Stenzel et al., 2021), por lo cual la demanda de A/C en edificaciones se ha incrementado.

En comunidades aisladas de la red eléctrica, donde la energía proviene de micro generadores, se hacen esfuerzos para tener equipos eficientes y operarlos en condición de mínimo consumo de energía (J.A. Aguilar-Jiménez et al., 2020; Horvath et al., 2014; Marc et al., 2010a). Si además se trata de una región cálida y la temperatura en sus edificaciones supera la temperatura de confort, es necesario destinar cantidades considerables de energía para acondicionamiento de aire (Al-Atrash et al., 2020; Pokharel et al., 2020).

Por estos factores ha sido de interés el desarrollo de diferentes tecnologías de A/C con bajo consumo de energía eléctrica, como el enfriamiento por absorción activado con energía solar térmica, sin embargo, su eficiencia operacional está relacionada con la variación de condiciones meteorológicas como; radiación solar, temperatura ambiente y humedad relativa.

La radiación solar demarca la activación de un sistema por absorción termosolar. Un alto nivel de radiación solar permite que el circuito de captación de energía solar alcance y mantenga la temperatura requerida para la activación del sistema de enfriamiento por absorción, a su vez, un almacenamiento correctamente dimensionado permite la operación del sistema en días nublados.

La temperatura ambiente y humedad relativa influyen directamente en la carga térmica de la edificación y en las condiciones termo higrométricas del sumidero de calor. Cuando ambas presentan niveles altos, la edificación requiere mayor cantidad de enfriamiento; mientras que el sumidero de calor presenta condiciones no aptas para reducir la temperatura del fluido caloportador en el circuito de enfriamiento.

El enfriamiento evaporativo ha presentado una solución para rechazo de calor ante altos niveles de temperatura ambiente, sin embargo, requiere de un suministro periódico de agua equivalente a la cantidad que se evapora con el aire. Además, un alto nivel de humedad relativa en el ambiente limita su funcionamiento.

Actualmente los habitantes del poblado Puertecitos enfrentan una problemática de escasez de agua potable, la disponibilidad de este recurso en la comunidad es fundamental y el punto más cercano para obtenerla se encuentra en un pozo ubicado a 32 km (CONAGUA, 2020). Además, la baja precipitación en la región ha afectado la recarga de este acuífero que se ha visto por intrusión salina provocada por el agua de mar.

La torre de enfriamiento encargada de rechazar el calor residual del SAATEP, es un componente indispensable para el funcionamiento del ciclo de enfriamiento por absorción, sin embargo, debido a su principio de funcionamiento (enfriamiento evaporativo) requiere una reposición periódica de agua que representa un consumo de aproximadamente 750 *lts/día* (Aguilar-Jiménez et al., 2020).

Debido a la escasez de agua potable en Puertecitos, no resulta viable desde un punto de vista ecológico, económico y social destinar la cantidad de agua potable requerida para reposición en el circuito de enfriamiento. Por ello, es necesario optimizar la operación del SAATEP, principalmente en el subsistema de enfriamiento (rechazo de calor) y con esto reducir el consumo de agua potable y el impacto de las condiciones meteorológicas sobre su eficiencia.

Es conocido que el subsuelo a profundidades someras (0-5 m) presenta una menor variación de temperatura con respecto al ambiente (Vidhi, 2014), y al aumentar la profundidad las condiciones meteorológicas pierden influencia sobre la temperatura del subsuelo. De modo que, existe una profundidad a la cual la temperatura del subsuelo permanece constante a lo largo del año, la cual puede encontrarse entre 5 y 10 m de profundidad según el tipo de suelo o roca presente y la magnitud de las condiciones meteorológicas en superficie (Stylianou et al., 2019).

El presente proyecto de investigación evalúa de manera teórica el desempeño de intercambiadores de calor geotérmicos de tipo circuito cerrado acoplados a un sistema de enfriamiento por absorción, que permitan proporcionar un sumidero con menor temperatura y menor interacción con la variación de las condiciones meteorológicas durante la temporada cálida del año, con la finalidad de reducir el consumo de agua potable y energía del sistema.

Un intercambiador de calor geotérmico presenta una lista de ventajas con respecto a la torre de enfriamiento;

- Al ser un sistema de circuito cerrado no requiere suministro de agua.
- Disminución de las dimensiones en superficie del SAATEP (reemplazando la torre de enfriamiento y el depósito para el agua de reposición).
- Disminución del costo de operación del SAATEP.
- No necesita la incorporación de químicos y/o limpieza periódica por formación de lodos en la torre de enfriamiento.
- Su incorporación al subsuelo la exenta de daños por: condiciones meteorológicas, exposición en un área recreativa y/o vandalismo.

1.2.- Antecedentes

Desde tiempos remotos (≈ 3000 A.C.) el ser humano encontró protección de condiciones meteorológicas extremas como altas temperaturas o heladas excavando cavernas y/o cuevas subterráneas (Goel et al., 2012), donde la inercia térmica de rocas y suelos genera una diferencia de temperatura con respecto al ambiente (Figura 1). Esto marcó el inicio del uso de la geotermia con propósitos de climatización.

En el año 900 D.C. edificaciones de la arquitectura iraní captaban aire del exterior con torres de viento similares a la Figura 2, y lo hacían descender por cambios de densidad provocados por el contacto con la torre. Al llegar al fondo de la torre, el aire pasa a un túnel subterráneo donde reduce su temperatura por el contacto con el subsuelo y una fuente de agua. Los arreglos para circular el aire frío dentro de la edificación se llevan a cabo mediante la apertura de puertas y ventanas (Bahadori, 1978).

En 1875, J. Wilkinson un arquitecto rural de Baltimore, comenzó la construcción de un granero que concluyó en 1878 para el agricultor Benjamin Hershey. Este granero utiliza un túnel subterráneo con 150 metros de longitud para circular aire en su interior y mantener una temperatura interior de $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ en los establos para vacas lecheras durante la temporada de verano (Fishburn, 1947).

Las aplicaciones de la geotermia con propósitos de climatización descritas hasta ahora han sido pasivas, por su nulo requerimiento de energía eléctrica. Fue el ingeniero mexicano Heinrich Zoelly (1862-1937) el primero en proponer una bomba de calor geotérmica accionada eléctricamente para la producción de calefacción en baja temperatura, por lo cual obtuvo una patente suiza con número 59350 en el año 1912 (Zogg, 2008).

Sin embargo, fue hasta el año 1945 cuando Robert C. Webber empleado de Indianápolis Power and Light Company instaló la primera bomba de calor geotérmica en la bodega subterránea de su vivienda ubicada en Indianápolis, Indiana. A pesar de tener un menor consumo energético, algunos factores como el requerimiento técnico/económico para llevar a cabo una excavación han limitado la comercialización

de esta tecnología y desde mediados del siglo XX hasta la fecha los equipos convencionales (tipo ventana, split) han dominado el mercado de A/C.

Con la creciente problemática ambiental, algunos países han establecido metas para reducir sus emisiones contaminantes a la atmosfera. Se ha estimado que 20% del consumo mundial de energía es para A/C en edificaciones (IEA, 2018), por ello en las últimas décadas se ha intensificado el desarrollo e instalación de equipos de A/C más eficientes. Diferentes estudios en la bibliografía han dejado de manifiesto el potencial de tecnologías como las bombas de calor geotérmicas (GSHP, por sus siglas en inglés) y los intercambiadores de calor tierra-aire (EAHE, por sus siglas en inglés) (Agrawal et al., 2019), sin embargo, su viabilidad continúa limitada por factores que varían según las características de cada proyecto.

Los EAHE y las GSHP tienen en común que aprovechan la diferencia de temperatura del subsuelo para proveer enfriamiento o calefacción según la temporada del año, pero su principio de funcionamiento es distinto.

Un EAHE está formado por tubería integrada al subsuelo (Figura 3), con el propósito de circular aire en su interior para ser calentado o enfriado según la temporada del año, y posteriormente introducirse en una edificación con propósitos de climatización (Ríos Arriola, 2019). Estos sistemas suelen alcanzar altos niveles de eficiencia debido a la poca cantidad de energía que requieren para operar, a pesar de esto, diferentes estudios reportan que en la mayoría de los casos el aire proveniente del EAHE que ingresa a la edificación no es suficiente para satisfacer totalmente la carga térmica de una edificación (Al-Ajmi et al., 2006). Por este motivo, algunos autores han optado por utilizarlo de forma híbrida con otros sistemas (Bansal et al., 2012; Khalajzadeh et al., 2012).

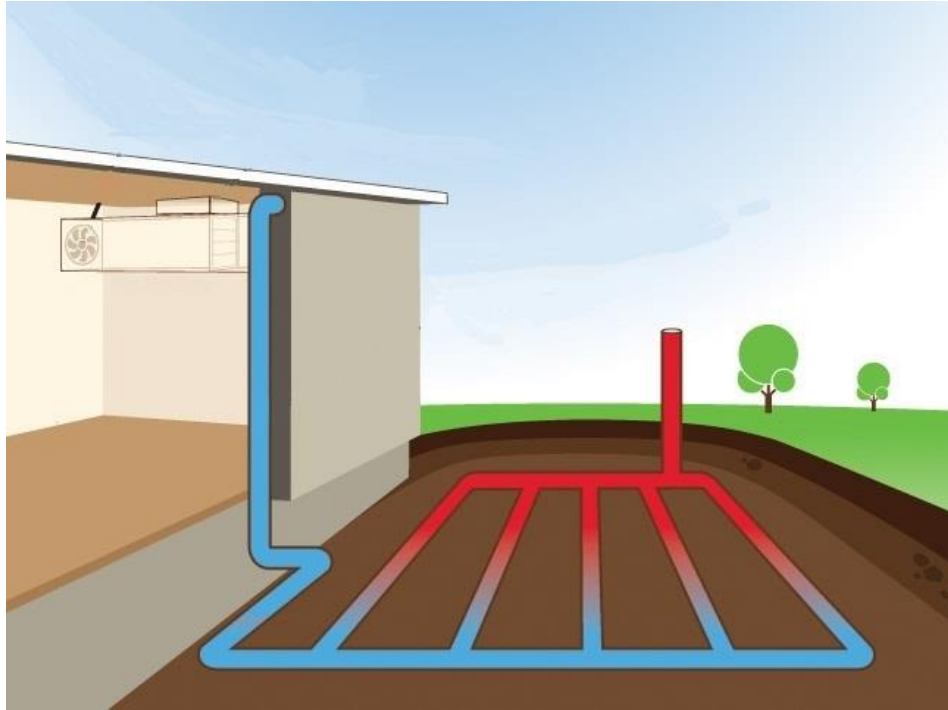


Figura 1.- Intercambiador de calor tierra-aire.

Sodha et al. (1985) realizaron un estudio experimental sobre el desempeño de un EAHE para climatizar un complejo médico en Mathura, India. La tubería enterrada fue hecha con concreto, tenía una longitud de 80 m y un área transversal de $1.05 \times 0.75 \text{ m}^2$ por la cual circulan 3.1 kg/s de aire impulsado por dos ventiladores de 500 W. En sus resultados reportan que su EAHE tiene una capacidad de enfriamiento promedio diaria de aproximadamente 512 kWh en la temporada de verano, mientras que la humedad relativa del aire a la salida del EAHE se mantiene entre 75-89 % sin presentar condensación.

Goswami & Ileslamlou (1990) estudiaron teóricamente el desempeño a largo plazo de un EAHE que opera 16.5 horas al día en circuito cerrado con propósitos de enfriamiento. Al inicio del primer día el EAHE presentó un COP de 13.5, y después de 16.5 h de funcionamiento disminuyó hasta 12.5. Para el día 90 inició con un COP de 10.5 que posteriormente bajó a 9 después de 16.5 h de funcionamiento, ellos concluyeron que el suelo presenta una acumulación de calor debido a que el tiempo de operación es mayor en comparación con el tiempo de recuperación.

Bansal et al. (2012) estudiaron experimentalmente un EAHE formado por tubería PVC con diámetro de 0.15 m, longitud de 23.42 m, enterrado a una profundidad de 2.7 m acoplado con un enfriador evaporativo (0.65 m x 0.65 m x 0.89 m) como se muestra en la Figura 4. En la sección inicial se acopló un ventilador (0.75 kW) de manera que el aire que circula por el EAHE ingrese al enfriador. El estudio se realizó con el software FLUENT 6.3 bajo las condiciones ambiente de Ajmer, India. Basándose en la ASHRAE-55, ellos encontraron que el EAHE puede proveer confort térmico (calentamiento y enfriamiento) el 48.9 % del año (2598.9 kWh) y acoplándolo con el enfriador evaporativo alcanzan el 59.8 %.

Singh & Singh (2015) analizaron el desempeño de un EAHE para climatizar un salón de clases en Gurdaspur, India. El EAHE fue hecho con tubería cuadrada de acero galvanizado enterrada a 3 m, la cual se unió en sus extremidades a dos secciones verticales de PVC como muestra la Figura 5. En la sección inicial de PVC se acopló un ventilador de 1 HP para circular el aire a lo largo del EAHE, en la sección vertical de salida colocaron material aislante con la finalidad de evitar transferencia de calor no deseada. Durante el verano, su sistema presentó una capacidad de enfriamiento máxima de 2.6 kW y un COP de 3.9. Ellos concluyeron que a pesar del mayor costo inicial en comparación con un sistema de A/C convencional, esta tecnología es una opción viable para climatización de espacios y la única restricción es la disponibilidad de espacio.

Congedo et al. (2020) estudiaron experimentalmente el acoplamiento de un EAHE con un sistema de A/C tipo mini-split para reducir el consumo energético de una edificación ubicada en Turín, Italia. Ellos encontraron que un EAHE formado por 16 tubos con 0.5 m de diámetro y longitud de 30 m conectados en paralelo enterrados a una profundidad de 3 m, es posible aumentar el COP del sistema dividido en 10% y destacaron la reducción de periodos de paro por condiciones climatológicas extremas.



Figura 2.- Instalación de EAHE (Modificado de Singh y Singh, 2015)

Las bombas de calor geotérmicas (BCG) son sistemas que pueden alcanzar altos coeficientes de desempeño (COP) en comparación con los sistemas convencionales de A/C, debido a que ambas funcionan bajo el principio de enfriamiento por compresión mecánica de vapor, pero una BCG sustituye el condensador convencional por un intercambiador de calor geotérmico enterrado a una profundidad a la cual la temperatura del subsuelo es considerablemente menor que la del ambiente (Figura 6).

En la actualidad su alto costo y escases en el mercado han impulsado el estudio de modificaciones a los sistemas convencionales de A/C (tipo dividido o ventana) con la finalidad de sustituir el condensador enfriado por aire ambiente por un intercambiador de calor geotérmico y optimizar el ciclo de enfriamiento mediante el aprovechamiento la temperatura del subsuelo en la etapa de condensación del fluido refrigerante.

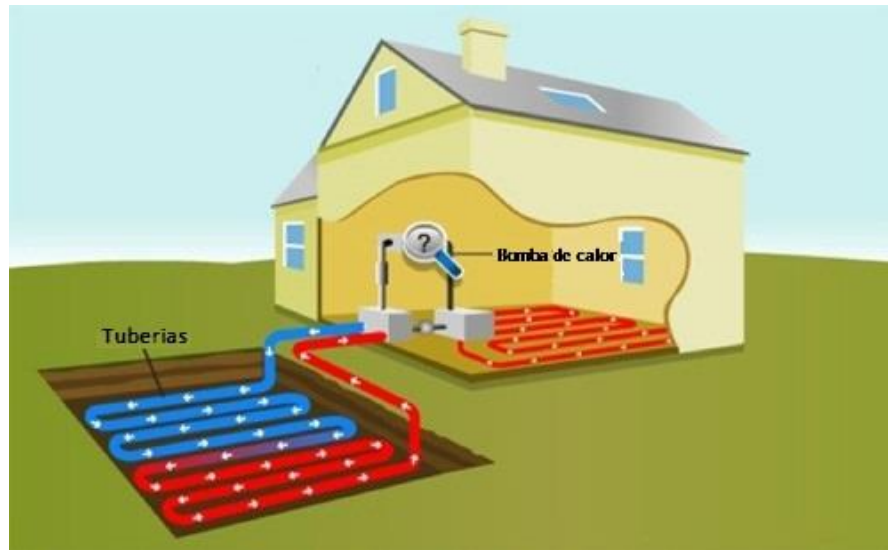


Figura 3. Bomba de calor geotérmica tipo horizontal de circuito cerrado.

De Swardt & Meyer (2001) realizaron una comparación entre un sistema de A/C con un condensador enfriado por aire y otro enfriado por agua proveniente de la red de distribución subterránea en Pretoria, Sudáfrica. Utilizaron un intercambiador de calor a contraflujo con tubos corrugados para realizar la transferencia de calor entre el fluido refrigerante y el agua de la red. En sus resultados muestran que utilizar el agua proveniente del subsuelo incrementa el COP del sistema en 14%, debido a la disminución del diferencial de temperatura entre la temperatura de condensación y la de evaporación. También realizaron un estudio económico comparando el costo de la modificación contra el A/C convencional y obtuvieron que con la tarifa de electricidad actual (0.0413 USD/kWh) la tasa de retorno de la inversión es menor a 3 años.

Permchart & Tanatvanit (2009) estudiaron experimentalmente el desempeño de un sistema de A/C tipo dividido (1 ton) modificado (Figura 7) para utilizar el subsuelo como sumidero del calor de condensación, por medio de un serpentín de cobre horizontal enterrado a 1 m de profundidad en Bangkok, Tailandia. Ellos encontraron que el COP del sistema puede mejorarse desde 2.5 hasta 3.3, 5.5 y 6.9 utilizando un intercambiador de calor geotérmico hecho de cobre con una longitud de 40, 50 y 67 m respectivamente. El ahorro sobre el consumo de energía eléctrica fue de aproximadamente 11.5 - 15%, debido a la disminución en la temperatura del refrigerante a la salida del intercambiador

de calor geotérmico, lo cual tiene un efecto directo sobre el consumo de energía del compresor.



Figura 4. A/C tipo Split modificado para condensar en el subsuelo (Permchart & Tanatvanit, 2009).

Said et al. (2010) estudiaron el uso de un intercambiador de calor geotérmico vertical como condensador en un sistema de A/C convencional para una vivienda promedio ($\approx 7.5 \text{ Ton}_r$) en la provincia oriental del reino de Arabia Saudita. Las propiedades y temperaturas del subsuelo fueron medidas experimentalmente mediante un test de respuesta térmica (TRT). Ellos calcularon un ahorro de 11,523 kWh/año y un aumento del EER de 6.26 a 7.8, al utilizar la temperatura constante del subsuelo ($32.2 \text{ }^\circ\text{C}$) como sumidero de calor sustituyendo al aire ambiente a 46°C .

Soni et al. (2016) analizaron experimentalmente el desempeño de un sistema de A/C tipo ventana (1.5 ton_r) modificado para condensar en el subsuelo. Fue instalado en un cuarto de pruebas expuesto al ambiente, construido con hojas de asbesto ($2.5 \times 2.5 \times 3 \text{ m}^3$). Realizaron una excavación ($3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$), donde colocaron dos serpentines formados con tubería de cobre; ambos con longitud de 38 m. El primero colocado de forma horizontal en el fondo (Figura 8a), y el segundo fue colocado de forma vertical en una de las paredes de la excavación (Figura 8b). Ellos estudiaron el comportamiento de este sistema de A/C modificado, operando de tres modos distintos: El primero utilizaba el sistema A/C tipo ventana de forma convencional. En el segundo, el condensador convencional del sistema de A/C fue reemplazado y el refrigerante fluyó por la tubería horizontal. En el tercer modo el condensador convencional fue reemplazado por el

serpentín vertical. Ellos concluyeron que el tercer modo de operación obtuvo mejores resultados, generando un ahorro promedio anual de 377.28 kWh. A pesar de que el serpentín horizontal tiene una menor temperatura, las caídas de presión son mayores, por ello la configuración vertical permite un mayor ahorro de energía eléctrica.



Figura 5.- Intercambiadores de calor geotérmicos como condensador en sistemas de A/C.
(a) Vertical colocado al fondo, (b) Horizontal colocado sobre una pared. Soni et al (2016).

Acuña et al. (2017) estudiaron el impacto de utilizar un intercambiador de calor geotérmico sustituyendo un condensador enfriado por aire ambiente en un sistema de A/C convencional activado con energía solar fotovoltaica operando en Mexicali, Baja California. El intercambiador de calor geotérmico vertical (tipo U) fue colocado a diferentes profundidades en un suelo húmedo arcilloso ($\alpha = 2.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$). Sus resultados muestran que a cualquier profundidad el intercambiador de calor geotérmico aumenta la fracción solar del sistema, los incrementos fueron de 41, 64, 82 y 78% para 1, 2, 4 y 10 m de profundidad respectivamente. Ellos concluyeron que la profundidad óptima corresponde a 4 m, donde la temperatura del subsuelo varía únicamente entre 23 y 26 °C durante el año.

De acuerdo a los resultados y hallazgos de los trabajos descritos en esta sección, se concluye que, a pesar de las diferencias en; tipo de edificación, características de suelo y condiciones meteorológicas de cada lugar, la circulación de fluidos caloportadores dentro de tuberías incorporadas al subsuelo tiene un efecto positivo en el desempeño termo energético de sistemas de A/C para edificaciones ubicadas en zonas con clima árido-cálido y/o desértico.

Ya sea como técnica pasiva para circular aire e ingresarlo directamente a una edificación (A. Singh & Singh, 2015) o acoplándolo a la entrada de un cooler (Bansal et al., 2012; Khalajzadeh et al., 2012). También modificando el condensador de un sistema convencional de A/C para proporcionar una menor temperatura de condensación. (Acuña et al., 2017; Congedo et al., 2020; De Swardt & Meyer, 2001; Permchart & Tanatvanit, 2009; Said et al., 2010; Soni et al., 2016). Todos estos trabajos obtuvieron mejoras en los sistemas de A/C colocando el intercambiador de calor geotérmico a profundidades someras (1-10 m). Por lo que se concluye que para este tipo de aplicaciones no es necesario realizar una gran excavación/perforación.

Hasta ahora la integración de intercambiadores de calor geotérmicos a sistemas de A/C se realiza en la etapa de rechazo de calor del ciclo de enfriamiento, mediante el acoplamiento con y/o la sustitución del componente encargado de rechazar el calor residual. Algunos trabajos realizan integración directa a la edificación y reducen la carga térmica de enfriamiento, sin embargo, no describen la forma ni el modo de operación.

Algunos trabajos descritos evalúan teóricamente el desempeño de intercambiadores de calor geotérmicos, dado que, su construcción conlleva un costo económico y técnico que en ocasiones no resulta viable para fines de experimentación. Sin embargo, existen otros datos que pueden ser obtenidos experimentalmente con mayor facilidad como las propiedades termo físicas del subsuelo, que generalmente se obtienen de la bibliografía basándose únicamente en la clase textural presente en superficie, siendo que esta cambia conforme aumenta la profundidad. Además, las propiedades termo físicas también están relacionadas directamente con el contenido de humedad en el subsuelo. Cuando el sitio de estudio se encuentra aislado de núcleos urbanos, los archivos meteorológicos son extrapolados a partir de estaciones ubicadas a varios kilómetros de distancia lo cual puede incrementar el rango de incertidumbre de los resultados.

El presente trabajo utiliza datos experimentales de edificación, meteorología y subsuelo obtenidos en sitio para evaluar teóricamente la integración de intercambiadores de calor geotérmicos al subsistema de enfriamiento (rechazo de calor) y al subsistema de agua fría (espacio a climatizar) de un sistema de enfriamiento por absorción, con la finalidad de aumentar su eficiencia y reducir su consumo de agua y energía.

1.3. Hipótesis

Es posible optimizar un sistema de enfriamiento por absorción activado con energía solar térmica mediante el acoplamiento de intercambiadores de calor geotérmicos de tipo circuito cerrado y con ello reducir su consumo de agua potable y energía.

1.4 Objetivo general

Estudiar la potencialidad del acoplamiento de intercambiadores de calor geotérmicos a sistemas de enfriamiento por absorción termosolar con la finalidad de reducir el consumo de recursos como agua y energía a través de un proceso de simulación teórico-experimental que permita cuantificar los ahorros para en un caso de estudio en específico, con la finalidad de realizar una comparativa con el consumo de recursos actual.

1.5 Objetivos específicos

- Caracterizar en sitio el suelo y meteorología del sitio de estudio, para generar información y utilizarla como dato de entrada en la simulación.
- Obtener experimentalmente el perfil de temperatura del subsuelo del sitio de estudio, para determinar la profundidad óptima para intercambiadores de calor geotérmicos.
- Elaborar un simulador que permita establecer diferentes formas de integración y modos de operación para intercambiadores de calor geotérmicos acoplados a un sistema de enfriamiento por absorción.
- Generar propuestas de intercambiadores de calor geotérmicos acoplados a un sistema de enfriamiento por absorción.
- Simular el desempeño térmico de los intercambiadores de calor geotérmicos acoplados a un sistema de enfriamiento por absorción.
- Analizar la factibilidad técnica de la tecnología.

1.6.- Descripción general de la tesis

CAPÍTULO 1: Se presentan las condiciones energéticas, geográficas, meteorológicas y sociales del poblado Puertecitos, destacando la necesidad de A/C con bajo consumo de energía eléctrica y la limitación operativa del SAATEP por la escasez de agua potable. Los antecedentes recopilan trabajos sobre la utilización del subsuelo como sumidero de calor alrededor del mundo. La hipótesis afirma la optimización del SAATEP con el acoplamiento de intercambiadores de calor geotérmicos, resaltando una lista de ventajas con respecto al modo de operación actual del SAATEP con torre de enfriamiento.

CAPÍTULO 2: Describe el fenómeno que causa la inercia térmica del subsuelo con respecto al ambiente y define la energía geotérmica de baja entalpía. Se mencionan los usos directos de la geotermia y su situación mundial actual, así como el papel de México en esta área. Se establecen las bases teóricas y el principio de funcionamiento de los ciclos de enfriamiento para mayor comprensión de este proyecto; refrigeración por absorción y compresión mecánica. Por último las características específicas de los componentes, estrategias de operación y actuales limitantes del SAATEP.

CAPÍTULO 3: Se propone la modificación del sistema de aire acondicionado termosolar de la escuela Puertecitos con la integración de intercambiadores de calor geotérmicos, incluyendo su descripción física y operativa. Se describen las herramientas y metodologías utilizadas para obtener los resultados de: análisis de la edificación, caracterización meteorológica y caracterización del subsuelo en el sitio de estudio, los cuales fueron utilizados para los estudios paramétricos y operativos de intercambiadores de calor geotérmicos en el SAATEP.

CAPÍTULO 4: Se presentan los resultados obtenidos de: análisis térmico de edificación, caracterización meteorológica, caracterización de suelo. También los resultados del estudio paramétrico que determinaron las características y dimensiones de los intercambiadores de calor geotérmicos propuestos. Se muestran los principales hallazgos del estudio operativo del sistema propuesto, junto a la cuantificación de la reducción de agua potable, carga térmica y calor auxiliar en el ciclo de enfriamiento del SAATEP. Se presentan las conclusiones generales del estudio.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS DE LA GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA

Definición de geotermia de baja entalpía, principales características y las tecnologías que la usan de forma directa para proveer diferentes servicios. Se incluye el panorama mundial actual y el escenario de México en usos directos de la geotermia. Posteriormente se hace énfasis en las tecnologías que aprovechan el subsuelo como fuente/sumidero de calor en sistemas de A/C y los diferentes tipos de intercambiador de calor geotérmicos que utilizan. Se describe el enfriamiento por absorción y se presenta la descripción física y operativa del sistema de A/C termosolar de la escuela de Puertecitos, para destacar las oportunidades de mejora con usos directos de la geotermia de baja entalpía.

2.1.- Geotermia de baja entalpía

La energía geotérmica de baja entalpía es aquella que aprovecha la inercia térmica del subsuelo a profundidades someras, donde por lo general la temperatura no es suficiente para llevar un fluido a su fase de vapor, pero es apta para aplicaciones como: climatización de edificaciones, secado de alimentos, etc. (Ríos-Arriola, 2019).

El comportamiento de la inercia térmica del subsuelo varía en relación a las propiedades termo físicas de los diferentes sustratos que componen el subsuelo a una profundidad determinada y a la variación de las condiciones meteorológicas en sitio. También la presencia de acuíferos a profundidades someras crea una perturbación en la temperatura del subsuelo, por lo que debe ser considerado en modelos de estimación.

En zonas con algún tipo de manifestación hidrotermal y/o vulcanismo, el perfil de temperatura del subsuelo puede verse afectado por gradientes térmicos anómalos o perturbados como se muestra en la Figura 9. Estos gradientes térmicos pueden ser estimados a partir de diferentes métodos: Método del Producto, Método de Bullard plots y Método no lineal de Bullard plots (Sena-Lozoya, 2019).

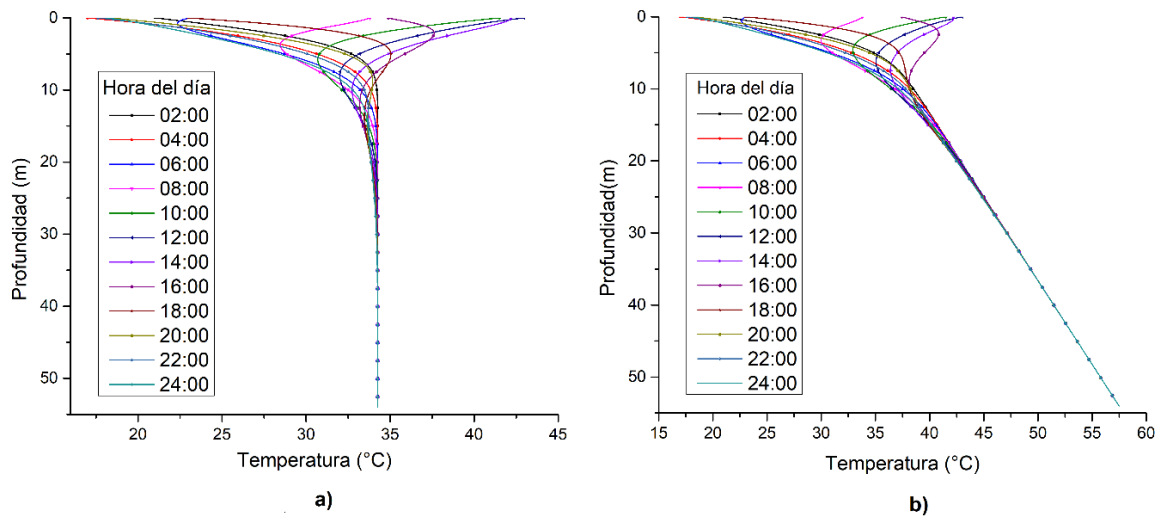


Figura 6. Gradiente térmico normal (a) Gradiente térmico anómalo (b)

En casos donde los gradientes térmicos anómalos en el subsuelo sean altos, la temperatura del suelo incrementará considerablemente a medida que aumenta la profundidad como muestra la Figura 9-b, esto amplía el rango de posibles usos directos de la geotermia. Según la magnitud del gradiente geotérmico ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$) y la profundidad que se alcance pueden encontrarse condiciones propicias para activar sistemas geotérmicos de mediana entalpía (Ciclos binarios, desalinización, etc.).

2.2.- Usos directos de la geotermia de baja entalpía

Algunos de los usos directos de la energía geotérmica utilizados en la actualidad son los siguientes: Acuicultura, balneología, bomba de calor geotérmica (BCG), calor para procesos industriales, climatización de edificaciones, climatización de invernaderos, derretimiento de hielo, esterilización de botellas, secado de cultivos agrícolas, suelo radiante. La bomba de calor geotérmica es la aplicación con mayor capacidad instalada alrededor del mundo con 77,547 MW_t , seguido por calentamiento de espacios con 12,768 MW_t y balneología con 12,253 MW_t , la Figura 10 muestra la distribución porcentual mundial.

Lund & Toth (2021) realizaron una revisión sobre la evolución de los usos directos de la geotermia a nivel mundial del año 2015 al 2020, ellos reportan que la capacidad mundial instalada es de 107,727 MW_t . El país líder en capacidad instalada es China con

40,610 MW_t, seguido por EUA (20,713 MW_t), Suecia (6,680 MW_t), Alemania (4,806 MW_t) y Turquía (3,488 MW_t), por lo tanto, estos países tienen el 70% de la capacidad mundial.

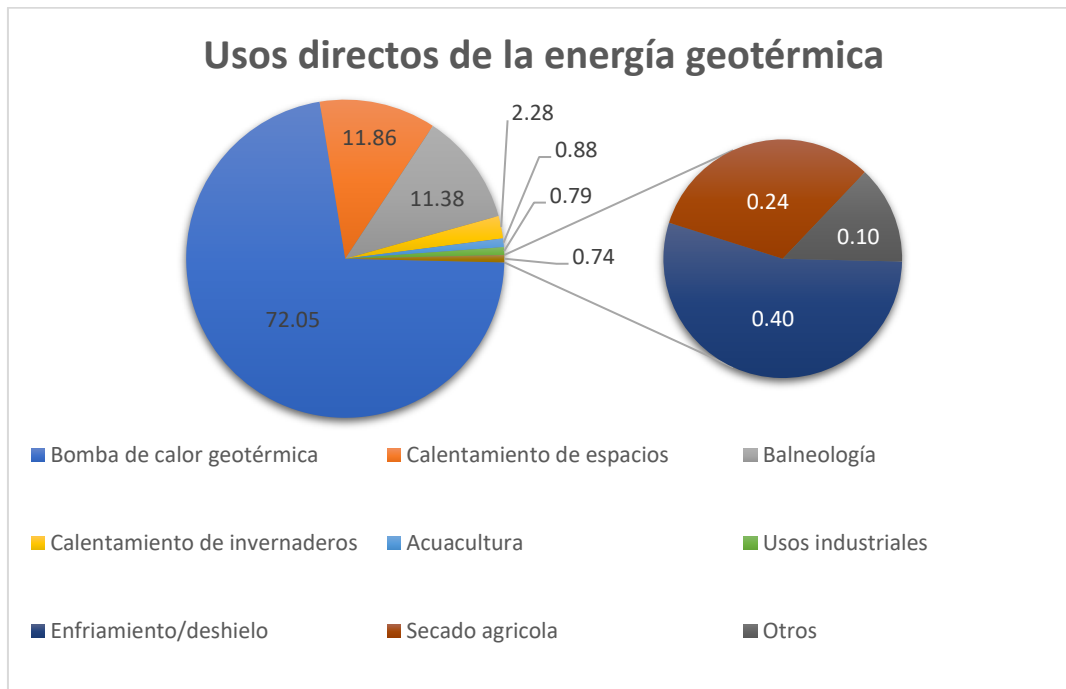


Figura 7. Distribución de usos directos de la geotermia en el mundo.

Actualmente México cuenta con una capacidad instalada de 156.1 MW_t en usos directos de la geotermia, los cuales se utilizan principalmente para balneología (155.3 MW_t) con fines recreativos y terapéuticos en instalaciones a cargo del sector privado. La tabla 1 muestra que los restantes 0.8 MW_t están distribuidos en: bombas de calor geotérmicas, calentamiento de edificaciones y secado de alimentos.

En 2018 se instalaron las primeras BCG en México, son 11 unidades distribuidas en 4 localidades que representan 0.133 MW_t (Romo-Jones et al, 2019). El primer proyecto consta de 2 bombas de calor geotérmicas (21 kW_t) para climatizar una escuela y una clínica en el campo geotérmico los Humeros. Posteriormente, se climatizó un invernadero con 4 BCG (35 kW_t) y un laboratorio con 3 BCG (42 kW_t) en la Universidad Politécnica de Baja California ubicada en Mexicali, BC. Finalmente se instalaron 2 BCG (35 kW_t) para climatizar un edificio en la universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Dentro del campo geotérmico Los Azufres operado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE; Generación VI) se aprovecha la temperatura de la salmuera

geotérmica antes de reinyectarla para; calentamiento de espacios y obtención de agua caliente sanitaria con una capacidad instalada de 0.115 MW_t (Gutiérrez-Negrín et al., 2020).

Tabla 1. Usos directos de la geotermia en México. (Gutiérrez-Negrín et al., 2020)

| Uso | Capacidad instalada (MW _t) | Uso de energía anual (TJ/yr) | Factor de capacidad |
|-----------------------------|--|------------------------------|---------------------|
| Calentamiento de espacios | 0.115 | 3.627 | 1 |
| Calentamiento por distrito | 0 | 0 | 0 |
| Enfriamiento de espacios | 0 | 0 | 0 |
| Calefacción de invernaderos | 0 | 0 | 0 |
| Piscicultura | 0 | 0 | 0 |
| Cría de animales | 0 | 0 | 0 |
| Secado agrícola | 0.518 | 13.23 | 0.81 |
| Procesos industriales | 0 | 0 | 0 |
| Derretimiento de hielo | 0 | 0 | 0 |
| Balneología | 155.347 | 4166.512 | 0.85 |
| Otros usos | 0 | 0 | 0 |
| Subtotal | 155.981 | 4183.37 | 0.85 |
| Bombas de calor geotérmicas | 0.133 | | |
| TOTAL | 156.114 | 4183.37 | 0.85 |

2.3- El subsuelo como fuente/sumidero de calor

Es conocido que la temperatura ambiente presenta un amplio intervalo de variación diurna y estacional, debido principalmente a las propiedades termo físicas del aire. Mientras que, el intervalo de variación en la temperatura del suelo es más estrecho y disminuye conforme aumenta la profundidad. Este fenómeno provoca un diferencial (ΔT) entre la temperatura ambiente y la del subsuelo a una determinada profundidad.

Por ejemplo, en la Figura 11 se observa que la temperatura del suelo en contacto con el aire ambiente ($y=0$ m) presenta una variación cercana a 28 °C durante un día cálido. Conforme aumenta la profundidad esta amplitud en la variación de temperatura decrece, de modo que a 0.4 m de profundidad la variación es menor a 1 °C.

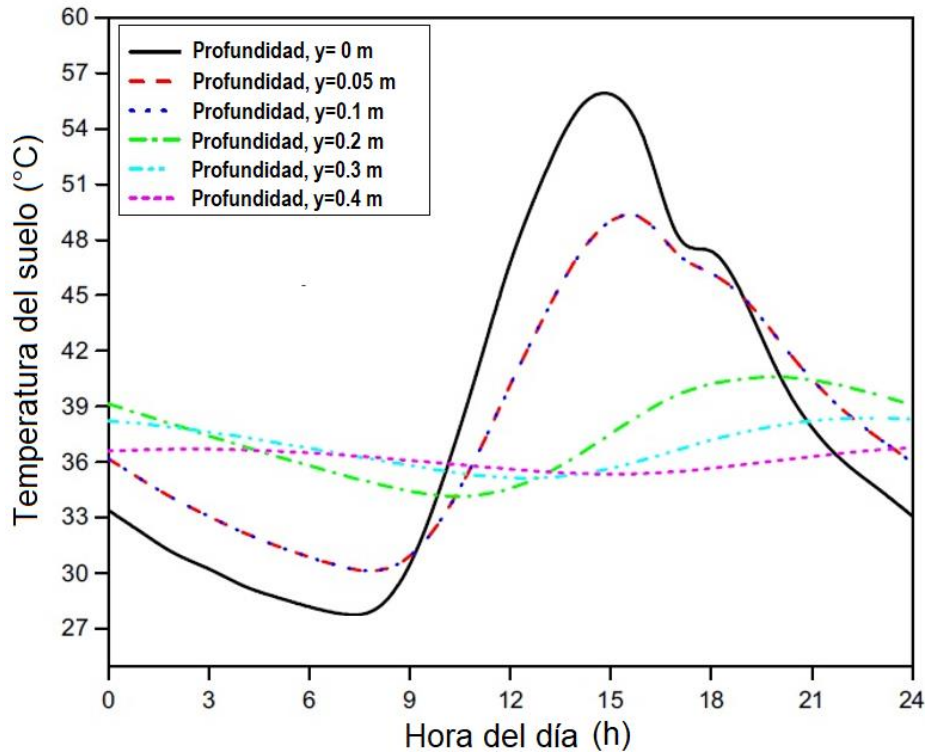


Figura 8. Variación diaria de la temperatura del subsuelo. Singh & Sharma,(2017).

En resumen, la variación diaria de las condiciones meteorológicas en superficie generalmente pierde influencia en el subsuelo a menos de 1 m de profundidad, sin embargo, la variación anual de las condiciones meteorológicas tiene una mayor influencia en la temperatura del subsuelo.

A manera de ejemplo, la Figura 12 muestra la variación anual de la temperatura ambiente y la del subsuelo para la ciudad de Mexicali, BC, México. Es posible observar que la variación meteorológica anual tiene una mayor influencia en la temperatura del subsuelo, dado que a 4 m de profundidad aún existe una variación de aproximadamente 3 °C.

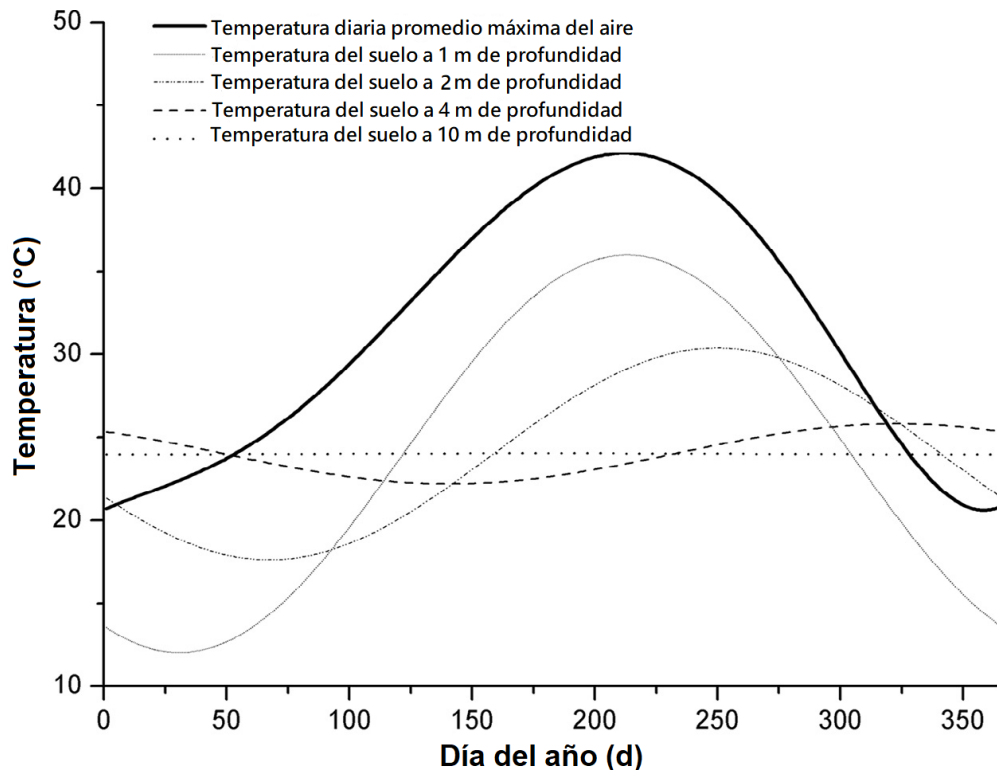


Figura 9. Variación anual de la temperatura del subsuelo. Acuña et al., (2017).

A pesar de la diferencia entre la variación anual y diaria, en ambas Figuras se muestra que la amplitud de la onda de temperatura disminuye conforme aumenta la profundidad. Este comportamiento térmico al que también se le conoce o denomina inercia térmica es característico de cualquier zona cortical (plataforma terrestre), siempre y cuando no presente alteraciones que provoquen gradientes térmicos anómalos en el subsuelo.

Diferentes tipos de intercambiadores de calor aprovechan esta inercia térmica para utilizar el subsuelo como fuente/sumidero de calor con el propósito de aumentar/reducir la temperatura de un fluido. Esta energía térmica almacenada a poca profundidad tiene diferentes denominaciones: geotermia somera, geotermia-solar y/o energía geotérmica de baja entalpía (Llopis & Rodrigo, 2008).

2.4 Intercambiadores de calor geotérmicos

Un intercambiador de calor geotérmico (GHE por sus siglas en inglés) es un componente que permite el intercambio de calor entre el subsuelo y un fluido caloportador por medio de tubería subterránea (Javadi et al., 2019). Actualmente existen diferentes configuraciones de GHEs, los cuales pueden agruparse en verticales y horizontales (Figura 13) (Aresti et al., 2018).

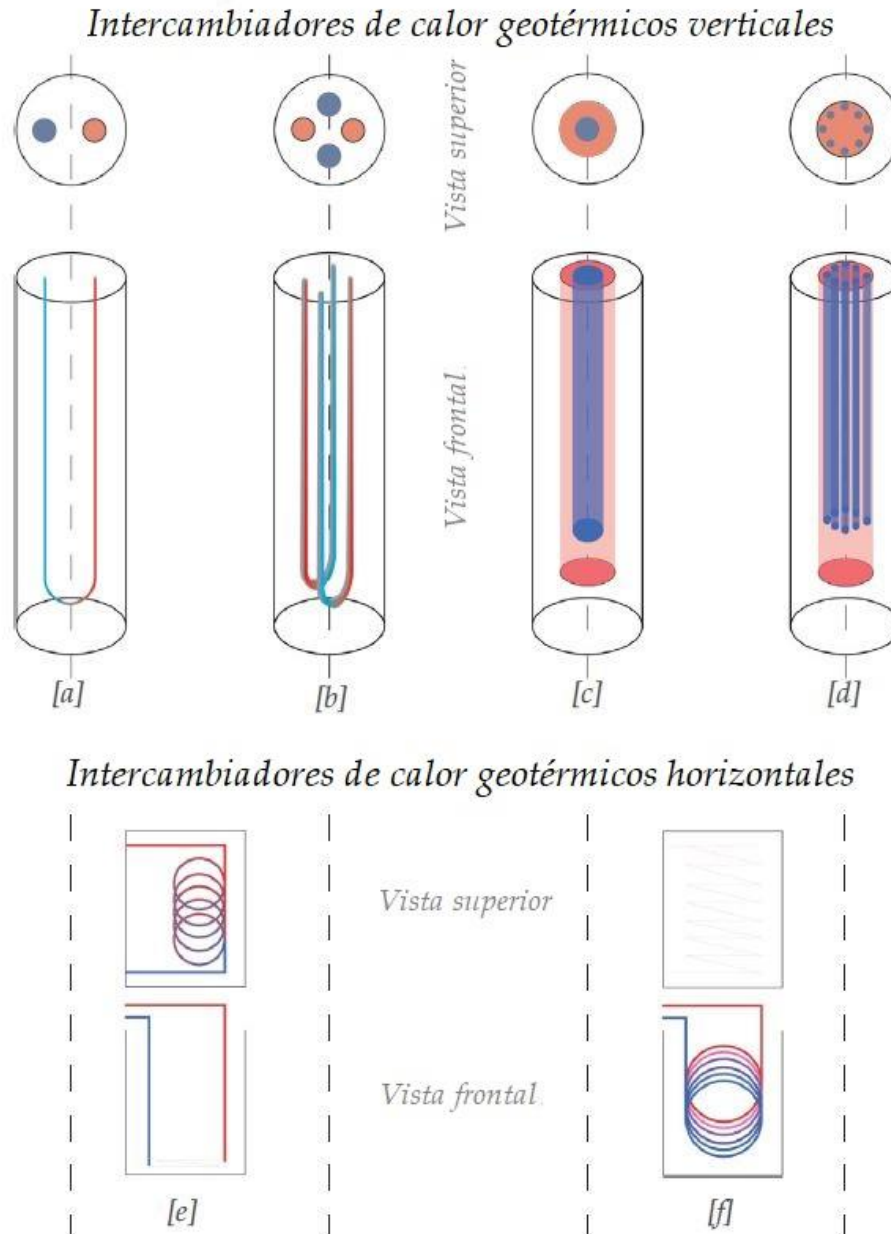


Figura 10. Diseños comunes de GHE: (a) tubo en U simple, (b) tubo en U doble, (c) coaxial simple, (d) coaxial complejo, (e) bucles deslizantes superpuestos, (f) vertical bucles en espiral. (Aresti et al., 2018)

Según información reportada por Asgari et al.,(2020) los intercambiadores de calor geotérmicos verticales transfieren más calor por unidad de área, y se utilizan cuando la demanda de extracción/retiro de calor es mayor. También se opta por utilizarlos cuando el espacio disponible es limitado y/o cuando el suelo es rocoso. Su principal limitante es el alto costo tecno económico que conlleva realizar una perforación vertical profunda.

Los de tipo horizontal generalmente se instalan entre 1 y 5 m de profundidad, esto genera que el costo tecno económico de instalación sea menor, sin embargo, requieren una cantidad considerable de espacio. Además, la transferencia de calor con el subsuelo a profundidades someras es perturbada por las condiciones meteorológicas y repercute directamente en la eficiencia de este tipo de intercambiadores de calor.

Independientemente del tipo, un intercambiador de calor geotérmico es el componente más importante de un sistema geotérmico, dado que está directamente relacionado con la eficiencia del sistema y su costo tecno económico. Debido a su influencia en la viabilidad de un proyecto geotérmico, diferentes estudios de investigación han sido enfocados a su optimización abordando diferentes partes de su proceso térmico.

Algunos autores han intentado optimizar la tasa de transferencia de calor del fluido caloportador por medio de diferentes técnicas. Du et al.,(2020) y Kapıcioğlu & Esen, (2020) propusieron la integración de nano fluidos para intercambiadores de calor geotérmicos que utilicen agua como fluido refrigerante. A pesar de utilizar nano fluidos diferentes (CuO y Al₂O₃-etilenglicol) ambos reportan mejoras menores al 5% en el COP de sus sistemas. Ellos reportan que esto se debe al incremento de la potencia requerida por la bomba para circular el agua con nano fluidos y a las largas secciones lineales que presentan la mayoría de los intercambiadores de calor geotérmicos, destacando que es importante la colocación de curvas cada cierta distancia para colisionar los nano fluidos.

Para intercambiadores de calor geotérmicos que utilizan aire como fluido caloportador Lee et al., (2019) estudiaron experimentalmente la incorporación de placas perpendiculares al flujo de aire, con la finalidad de generar turbulencia y mejorar la transferencia de calor. Su propuesta experimental mejoró redujo 7.3 °C la temperatura del aire, sin embargo, generó una caída de presión de 755 Pa. Por este motivo, en ese

mismo estudio analizaron de forma numérica varios diseños alternativos y concluyeron que una tubería con paredes corrugadas en espiral es la mejor propuesta logrando una reducción de temperatura de 7.7 °C con una caída de presión de 55 Pa.

Diferentes autores han concluido que la conductividad térmica del material es despreciable en la mayoría de las ocasiones debido a su corto espesor (Sakhri et al., 2020; Serageldin et al., 2016). Por este motivo, no se han enfocado tantos estudios en la búsqueda del material óptimo para la transferencia de calor con el subsuelo, esta selección se realiza en base a la compatibilidad del fluido con la tubería y al recurso económico disponible para adquirirlo.

También se han realizado optimizaciones al rendimiento de intercambiadores de calor geotérmicos modificando la tierra circundante. Li et al., (2019) estudiaron experimentalmente el desempeño de un EAHE como sistema de enfriamiento en Harbin, China y acoplaron un sistema de riego para simular la precipitación natural de la zona. Reportaron que incrementar el contenido de humedad en el suelo de 0.37 cm³/cm³ a 0.42 cm³/cm³ disminuye la temperatura de salida del aire en 1.6 °C, por lo cual concluyeron que un suelo húmedo permite reducir la longitud del EAHE.

Agrawal et al., (2020) realizaron un estudio experimental sobre el desempeño de un EAHE rodeado por una mezcla de arena y bentonita como material de relleno. Sus resultados muestran que utilizar esta mezcla en condiciones de saturación mejora la capacidad de enfriamiento del EAHE en 38.4% comparado con el suelo seco de la región. Además, después de 6 h de funcionamiento continuo, el desempeño térmico del EAHE con la mezcla arena-bentonita disminuye únicamente en 7%, a diferencia del 22 % de disminución que presenta un EAHE operando con el suelo seco de la región.

2.5 Sistemas de enfriamiento por absorción

El proceso de enfriamiento por absorción es en su mayoría similar al proceso de refrigeración por compresión mecánica de vapor, la principal diferencia radica en que el compresor eléctrico es sustituido por un compresor térmico, el cual es formado por un pequeño ciclo: absorbedor, condensador, generador, válvula de expansión como muestra la Figura 14. Esta modificación al mecanismo de compresión permite una mayor flexibilidad para el acoplamiento de una fuente térmica de activación. Otra diferencia es que en lugar de utilizar un solo fluido de trabajo (refrigerante), en el enfriamiento por absorción se utiliza una mezcla de fluidos de trabajo (refrigerante-absorbente).

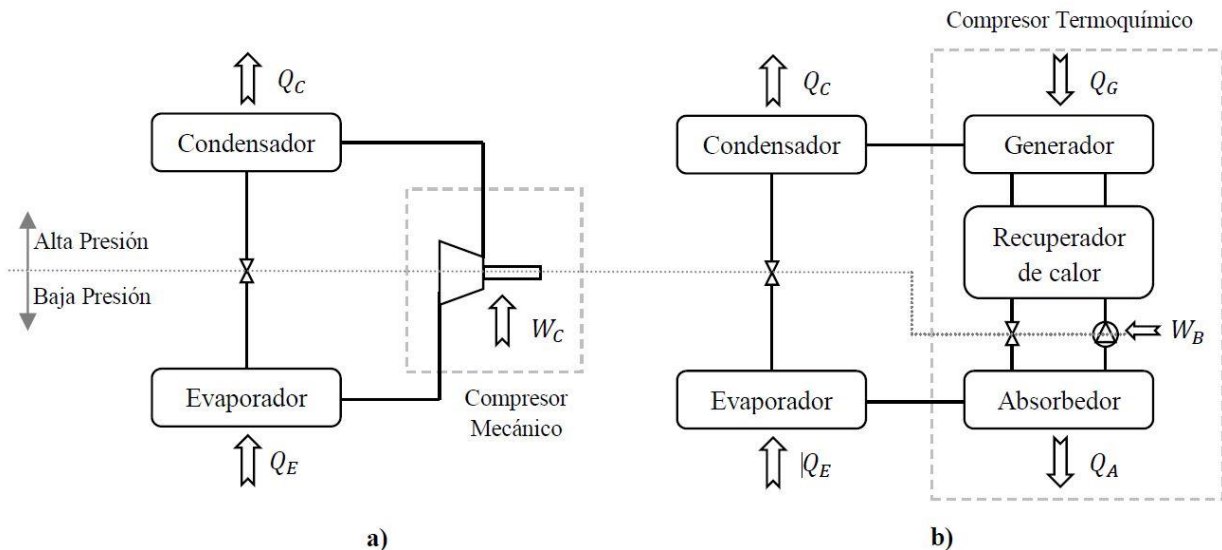


Figura 11. Ciclo de compresión mecánica (a) y de absorción de simple efecto (b). (Vereda Ortiz, 2015)

El enfriamiento por absorción comienza en el generador, donde se realiza la integración directa o indirecta de la fuente térmica de activación. La integración directa consiste en introducir al generador el calor proveniente de la quema de un combustible fósil como diesel o gas natural, que cede su calor de combustión directamente a la mezcla de fluidos de trabajo. La integración indirecta utiliza un fluido caloportador a alta temperatura (80-100 °C), que previamente recibió calor de una fuente térmica, el cual puede ser agua o vapor de agua, y cede su calor hacia la mezcla de fluidos de trabajo por medio de un intercambiador de calor.

En cualquiera de los dos modos de activación, la adición de calor en el generador provoca que la mezcla de fluidos incremente su concentración de absorbente, al

evaporar al fluido con menor punto de ebullición conocido como “refrigerante”. El refrigerante evaporado abandona el generador y pasa al condensador, donde intercambia calor con una corriente de agua con menor temperatura llamada “agua de enfriamiento”, el vapor disminuye su temperatura y pasa nuevamente a su estado líquido. Posteriormente abandona el condensador y es sometido a un proceso de estrangulamiento mediante una válvula de expansión, con la finalidad de reducir su presión y temperatura. Una vez en estado de líquido saturado a baja temperatura, se introduce al evaporador donde vuelve a ebullición al intercambiar calor con una corriente de agua a mayor temperatura, la cual cede el calor latente requerido, reduciendo su temperatura, de modo que, se produce el agua fría para A/C.

Por su parte la mezcla de fluidos de trabajo con alta concentración de absorbente, abandona el generador y entra a un recuperador de calor donde cede calor a la mezcla de fluidos de trabajo diluida que esta a punto de entrar al generador. Posteriormente es sometida a un proceso de estrangulamiento en una válvula de expansión para reducir su presión y temperatura, incrementando su capacidad para “absorber” al refrigerante. A la salida de la válvula de expansión se dirige al absorbedor, donde absorbe (captura) al refrigerante que se esta evaporando en el evaporador. Cuando la mezcla de fluidos de trabajo llega al límite de su capacidad de absorción es bombeada hacia el generador y el ciclo comienza de nuevo.

Existen diferentes mezclas de fluidos de trabajo utilizadas en ciclos de absorción, las más comunes son; bromuro de litio-agua ($\text{LiBr-H}_2\text{O}$) y agua-amoniaco ($\text{H}_2\text{O-NH}_3$). También se utilizan en menor medida las mezclas; $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$, $\text{LiBr-HO (CH}_2\text{) OH}$, los cuales tienen menor desempeño en comparación con los dos más utilizados.

El ciclo de enfriamiento por absorción descrito hasta ahora corresponde al denominado “efecto simple” o de “un efecto”. Pero cabe mencionar que en la actualidad se han propuesto sistemas de “doble efecto” o “triple efecto” que básicamente, agregan generadores adicionales para producir más refrigerante provocando un incremento en la eficiencia. Sin embargo, requieren mayores cantidades de energía térmica para activarse dado que, sus temperaturas de activación son cercanas a 180°C .

A continuación, se describen una serie de estudios con diferente enfoque sobre sistemas de enfriamiento por absorción, con la finalidad de destacar sus ventajas, limitantes y áreas de oportunidad.

Marc et al (2010) estudiaron experimentalmente el desempeño de su sistema de enfriamiento por absorción termosolar instalado en una isla con clima tropical. Reportaron que los componentes con mayor consumo eléctrico son el ventilador de la torre de enfriamiento y la bomba utilizada en el campo de colectores solares, con 36 y 9% del total respectivamente, por ello los autores plantearon adecuaciones para reducir el consumo eléctrico de estos dos componentes. También destacaron que durante el mes de mayo los niveles de radiación solar disminuyen y con ello las ganancias térmicas de la edificación, esto provoca que el enfriador quede sobredimensionado y su $COP_{\text{eléctrico}}$ disminuye de 1.65 (abril) a 1.03 (mayo).

Eicker et al (2012) estudiaron un enfriador por absorción con capacidad de 15 kW activado con energía solar térmica y reportaron que el consumo de energía eléctrica puede disminuir en 30% sustituyendo la torre de enfriamiento por intercambiadores de calor geotérmicos para rechazar calor en el subsuelo. Destacaron que este sistema de rechazo de calor requiere únicamente una bomba para circular el fluido en el subsuelo y que las caídas de presión pueden minimizarse colocando los intercambiadores de calor geotérmicos verticales a 120 m de profundidad conectados en paralelo.

Shirazi et al (2018) realizaron una revisión sobre la tecnología de enfriamiento por absorción activada con energía solar térmica y mencionaron que uno de los desafíos y principales áreas de oportunidad para mejorar eficiencia de este tipo de sistemas es la tecnología utilizada para el rechazo de calor. Destacaron que en regiones con clima cálido y húmedo donde la temperatura de bulbo húmedo es alta, las tecnologías de enfriamiento seco (condensador de aire seco) y húmedo (torres de enfriamiento) se ven limitadas, y recomienda realizar adaptaciones y/o emplear tecnologías alternativas para rechazo de calor.

A pesar de que existen diferencias considerables en las condiciones meteorológicas y en las características de cada sistema de enfriamiento por absorción activado con

energía solar térmica descritos en los párrafos anteriores, todos tienen en común que el sistema de rechazo de calor es su principal factor limitante debido al alto consumo de energía eléctrica.

A su vez, los trabajos descritos en la sección 2.4 dejan de manifiesto el potencial de los diferentes tipos de intercambiadores de calor geotérmicos para rechazo de calor en el subsuelo, y vuelven de interés la integración de este tipo de tecnologías para reducir el tiempo de operación de motores eléctricos, como el ventilador de la torre de enfriamiento, las bombas del circuito de agua fría y las bombas del subsistema de captación y almacenamiento de energía solar. también reducir el consumo de calor auxiliar de la caldera diesel, principalmente en los días pico del periodo cálido. Al reducir la carga térmica y con ello la cantidad de calor de activación suministrado al enfriador por absorción, disminuye la cantidad de calor residual en el subsistema de agua de enfriamiento lo cual se ve reflejado en una menor cantidad de agua evaporada durante su operación.

2.6 Descripción física y limitantes operativas del SAATEP

La Figura 15 muestra representaciones reales de los subsistemas que componen el sistema de A/C por absorción termosolar de la escuela de Puertecitos (SAATEP) el cual trabaja con la mezcla bromuro de litio-agua (LiBr-H₂O), su capacidad es de 35 kW y se utiliza para climatizar cuatro aulas (8.75 kW/aula). Este sistema opera de lunes a viernes en un horario de 7 a 15 h durante el periodo cálido escolar (mayo-octubre), manteniendo las aulas a una temperatura interior promedio de 25 °C.



Figura 12. Sistema de A/C termosolar de la escuela de Puertecitos a). Subsistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica, b). Torre de enfriamiento y c). Unidad de enfriamiento por absorción. (J.A. Aguilar-Jiménez et al., 2020)

El Subsistema de Captación y Almacenamiento de Energía Solar (SCAES) que se muestra en la Figura 15^a, cuenta con un arreglo de colectores solares tipo tubos evacuados modelo Suntask/SHC24 (cinco series de cinco colectores) con un área total de captación de 110.25 m². El campo de colectores solares eleva la temperatura del fluido caloportador (agua) por encima de la temperatura de activación nominal del chiller (≈ 85 °C) para almacenarla en un termotanque con capacidad de 12 m³ y 0.025 m de

aislamiento radial. Este subsistema utiliza una bomba con capacidad de 3 Hp para circular el agua del termostanque al campo de colectores solares.

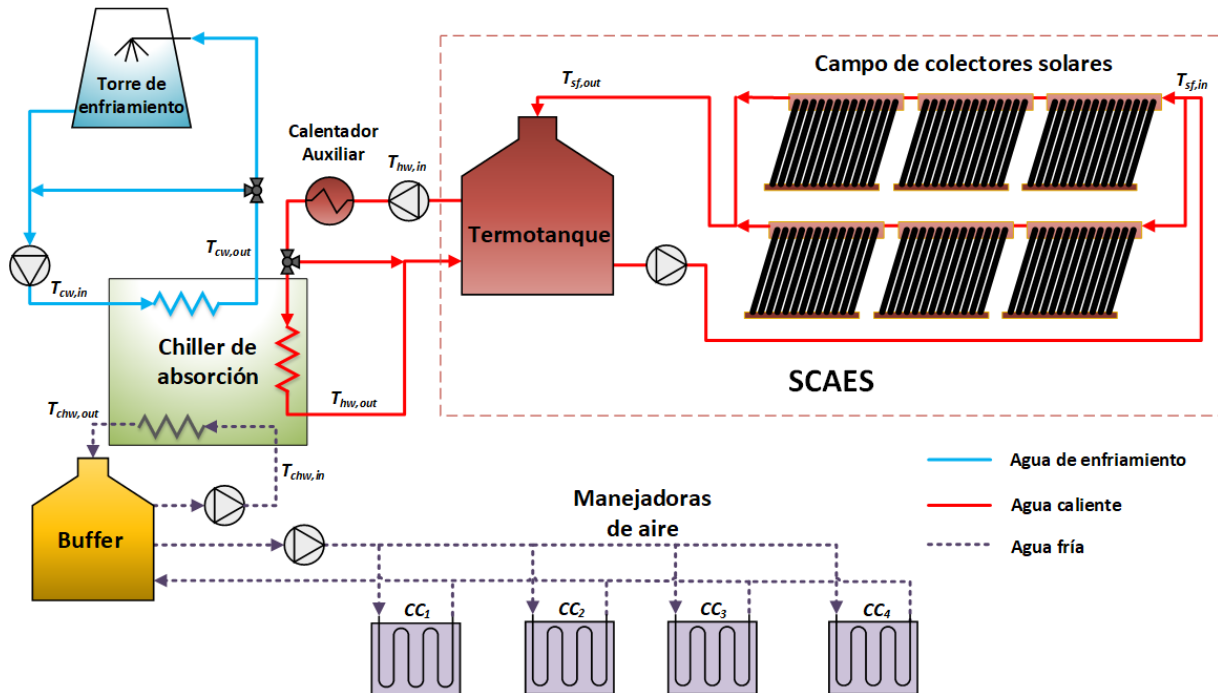


Figura 13. Configuración actual del SAATEP.

Una vez que el termostanque alcanza y mantiene la temperatura de activación requerida por el chiller, se utiliza otra bomba (3 HP) para llevar el agua caliente hacia el enfriador por absorción. De modo que, el flujo de agua caliente (8,300 kg/h) que sale del termostanque activa el ciclo de enfriamiento por absorción en el chiller y comienza el enfriamiento de agua.

El subsistema de agua fría cuenta con un tanque de almacenamiento “buffer” con capacidad de 1 m³, el cual recibe 6,000 kg/h de agua a 7 °C proveniente del chiller, utilizando una bomba sumergible de 0.876 kW (1.25 Hp). Del tanque buffer se extrae un flujo equivalente al de entrada (6,000 kg/h) para distribuirlo de manera uniforme (1,500 kg/h) en las cuatro unidades manejadoras de aire ubicadas en cada una de las aulas utilizando una bomba de 1.056 kW (1.5 Hp). La Figura 16 muestra la configuración del subsistema de agua fría, cabe mencionar que el tanque buffer tiene la finalidad de “amortiguar” aumentos abruptos en la temperatura del agua fría a la salida del aula, que pueden ser causados por cambios súbitos en las ganancias térmicas, como aumentar el número de personas al interior del aula, o un incremento en la temperatura ambiente, y

con esto disminuir la cantidad de calor sensible que retira el enfriador por absorción a la corriente de agua fría.

Para finalizar el ciclo, el subsistema de enfriamiento se encarga de rechazar el calor residual del proceso al ambiente utilizando una torre de enfriamiento de tiro inducido a contracorriente, que se muestra en la Figura 15b. Se utiliza una bomba de .96 kW (1.5 Hp) para circular 15,000 kg/h de agua a 33 °C desde el enfriador por absorción hacia la torre de enfriamiento. La finalidad de la torre de enfriamiento es reducir la temperatura del agua hasta 27 °C, entregando calor sensible cuando la temperatura del aire es menor a la del agua, y calor latente por evaporación del agua en la corriente de aire, siempre y cuando su humedad relativa sea menor al 100%. Actualmente este proceso consume en promedio 750 lts de agua por día.

Como se mencionó anteriormente, Puertecitos es una comunidad aislada de la red eléctrica nacional y las necesidades de energía eléctrica son cubiertas por una microrred solar-eólica, por lo cual es importante hacer uso eficiente de energía eléctrica en la localidad, principalmente durante la temporada de verano. El SAATEP tiene una cantidad considerable de bombas con alto consumo de energía eléctrica.

Además, la torre de enfriamiento consume alrededor de 750 lts/día de agua, partiendo del hecho de que esta población enfrenta una problemática de escases de agua potable y busca hacer uso racional de este recurso primario, no resulta viable desde una perspectiva ecológica, económica y social destinar la cantidad de agua de reposición requerida por la torre para su operación convencional.

CAPÍTULO 3

ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

Se propone la integración de dos sistemas geotérmicos para disipación de calor, con la finalidad de reducir el consumo de agua potable y energía eléctrica en el SAATEP. Se presenta el procedimiento y la validación experimental de las herramientas teóricas utilizadas para evaluar la factibilidad técnica de los sistemas geotérmicos propuestos.

3.1 Descripción de la propuesta tecnológica

La temperatura del subsuelo presenta niveles de temperatura menores con respecto a la temperatura ambiente durante el verano. Esta condición térmica se vislumbra atractiva para ser integrada y utilizada como como sumidero de calor durante la operación del SAATEP y con ello utilizar el mínimo consumo de agua potable y energía eléctrica posible.

Basado en lo anterior, se propone la integración de dos sistemas geotérmicos para disipación de calor. El primero es un intercambiador de calor tierra-aire (EAHE) que tiene la finalidad de reducir la carga térmica en el subsistema de agua fría, además, la inercia térmica del subsuelo permite que, durante invierno, pueda ser utilizado como sistema de calefacción. El segundo es un intercambiador de calor tierra-agua (EWHE) que tiene la finalidad de reducir la cantidad de agua potable evaporada en el subsistema de enfriamiento.

3.2 Intercambiador de calor tierra-aire

La Figura 17 muestra un EAHE operando en circuito cerrado para cada aula de la escuela del poblado Puertecitos. Para cada aula se utiliza un ventilador, dos tuberías verticales (encargadas de extraer e introducir aire) que están interconectadas a la entrada y la salida de la tubería horizontal incorporada al subsuelo. El ventilador se

encarga de la extracción de aire del aula, su circulación de en el subsuelo y su reintroducción al aula.

Se busca que el EAHE tenga una baja inversión inicial, por este motivo, debe ser construido con material y dimensiones comercialmente disponibles; como tubería PVC (Policloruro de Vinilo de grado sanitario) con diámetros entre 2 in y 10 in. Diferentes estudios la literatura concluyen usar materiales con alta conductividad térmica no impacta significativamente el desempeño de un EAHE, por lo tanto, se puede optar por utilizar materiales económicos y de fácil manipulación. (Bansal et al., 2010; K. S. Lee et al., 2019; Serageldin et al., 2016)

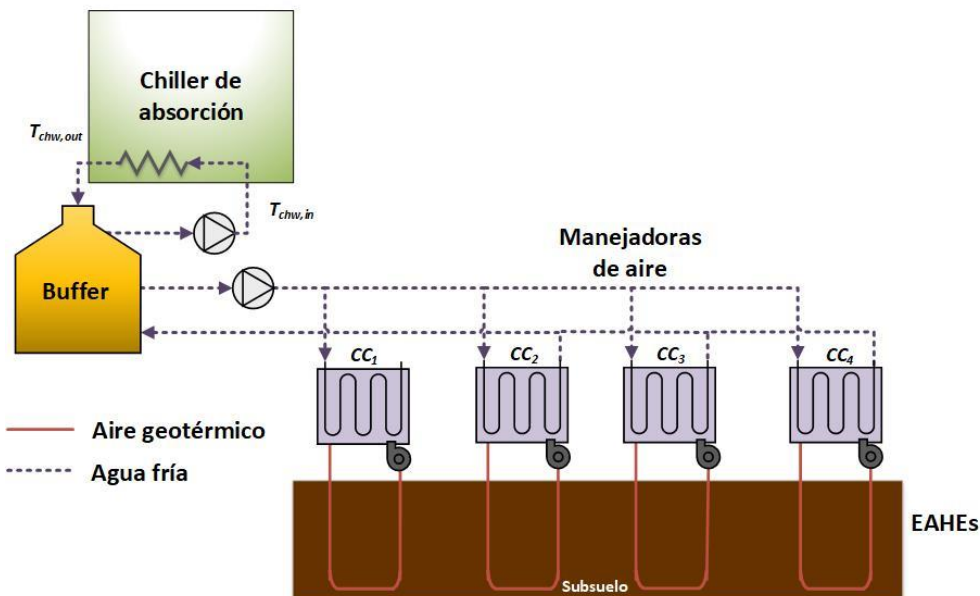


Figura 14. Diagrama del Subsistema de agua fría con EAHE en aulas.

Durante la temporada cálida del año, el EAHE trabaja de manera complementaria con el SAATEP, intercalando horarios. El SAATEP opera durante las horas de clase (7-15 h) y el EAHE opera durante el resto del día (0-7 h y 15-24 h) con el propósito de evitar ganancias térmicas en las horas restantes de radiación solar (15-18 h) y tratar de mantener la temperatura de 25 °C establecida por el SAATEP.

En la temporada de invierno, la inercia térmica que presenta la temperatura del subsuelo con respecto a la temperatura ambiente permite que el EAHE funcione como sistema de calefacción en las aulas de la escuela Puertecitos. Esto aumenta la viabilidad del EAHE debido a que tendrá más horas de utilización anual.

3.3 Intercambiador de calor tierra-agua

El segundo sistema geotérmico propuesto corresponde a un intercambiador de calor tierra-agua (EWHE) que utiliza una bomba para circular el agua de enfriamiento desde el enfriador por absorción hacia una red de intercambiadores de calor geotérmicos verticales tipo “U”, mediante un arreglo en paralelo. Se utilizan dos cabezales principales encargados de extraer e introducir agua de enfriamiento. De modo que, el agua portadora del calor residual del proceso de enfriamiento circula en el subsuelo para reducir su temperatura antes de entrar a la torre de enfriamiento.

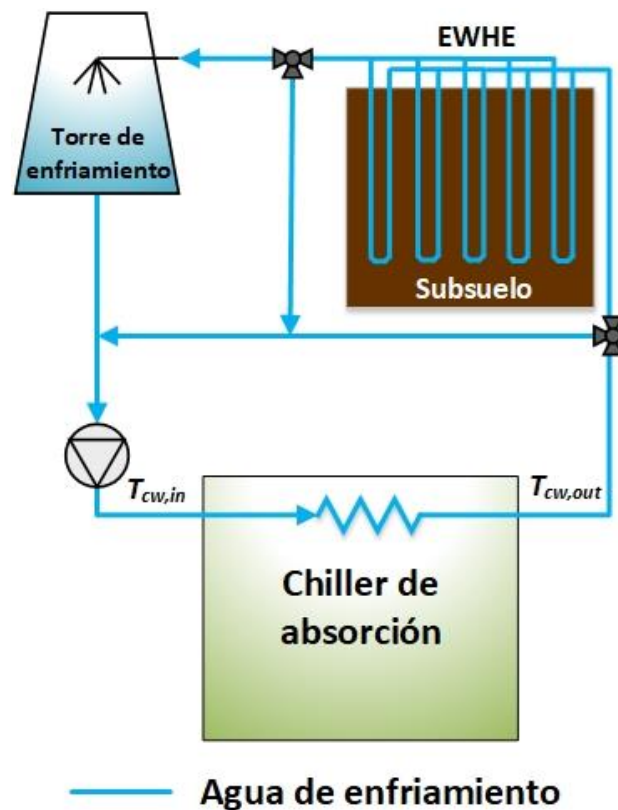


Figura 15. Diagrama del Subsistema de agua de enfriamiento con EWHE en aulas.

La Figura 18 muestra la configuración propuesta para el subsistema de enfriamiento, el cual cuenta con dos válvulas de 3 vías. La primera válvula está ubicada antes de la entrada del EWHE, y tiene la finalidad de enviar el flujo de agua de enfriamiento de regreso al enfriador por absorción en caso de que su temperatura se encuentre por debajo de 30 °C. La segunda válvula está ubicada a la salida del EWHE, con el propósito de enviar el flujo de agua de enfriamiento al enfriador en caso de que la temperatura del agua de enfriamiento a la salida del EWHE se encuentre por debajo de 30 °C.

Se busca que el EWHE tenga una baja inversión inicial y larga vida útil, considerando el bajo impacto de materiales con alta conductividad térmica, se busca que el EWHE sea construido con material resistente a la corrosión; como polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) con dimensiones comercialmente disponibles; diámetro entre 1 in y 2 in, su profundidad (longitud) debe estar entre 10 y 100 m, dado que alcanzar una profundidad mayor requiere equipos de perforación de mayor profundidad, la separación entre cada pozo se vislumbra entre 0.5 y 2 m. El flujo total de agua de enfriamiento es de 15,000 kg/h de modo que, es necesario considerar un numero de pozos en paralelo para asegurar que por cada EWHE circule un flujo que tenga un tiempo de residencia considerable en el subsuelo.

3.4 SAATEP con rechazo de calor geotérmico

La Figura 19 muestra el diagrama de la propuesta final de optimización para el SAATEP mediante la integración de los dos sistemas geotérmicos, el EAHE en el subsistema de agua fría y el EWHE en el subsistema de agua de enfriamiento respectivamente.

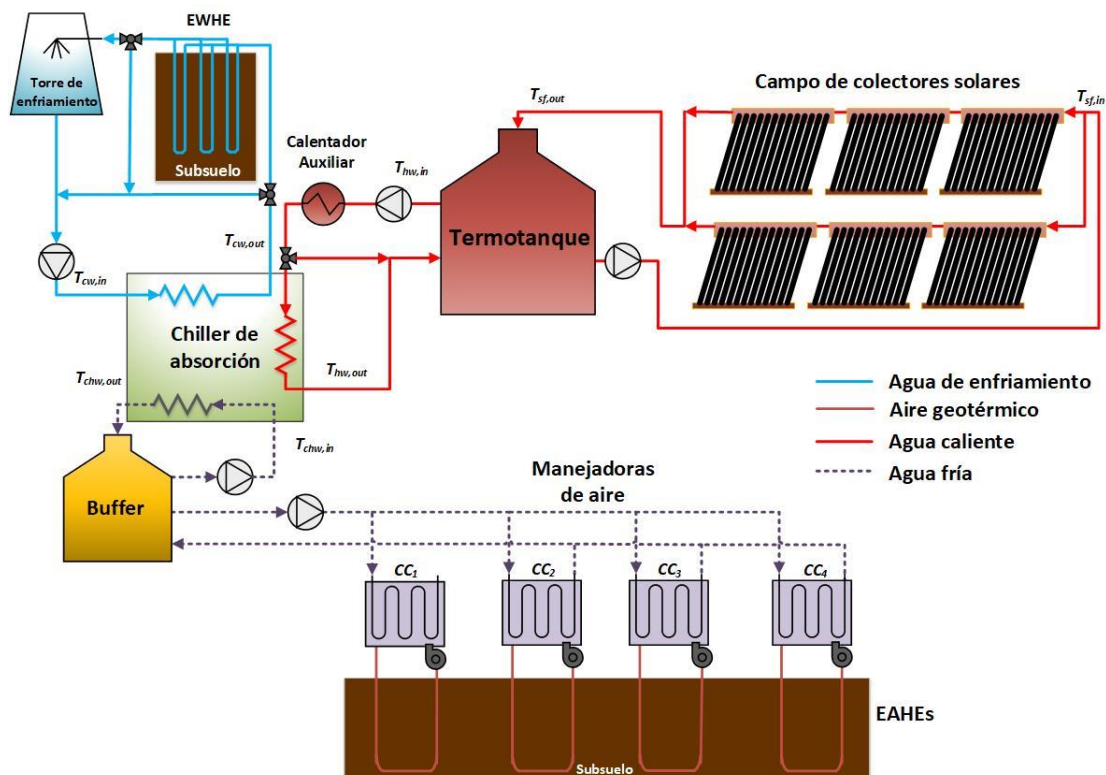


Figura 16. Diagrama de la propuesta tecnológica.

Como Puertecitos es una comunidad aislada de la red de transmisión eléctrica nacional, las necesidades de energía eléctrica son cubiertas por una microrred solar-eólica. Por este motivo, es importante reducir el consumo de energía eléctrica en la localidad, principalmente durante la temporada de verano. Además, enfrentan una problemática de escasez de agua potable, y no resulta viable desde un punto de vista ecológico, económico y social destinar la cantidad de agua potable requerida para reposición en el circuito de enfriamiento. Estos factores potencializan la necesidad de optimizar la operación del SAATEP.

La Figura 20 muestra una perspectiva aérea de la escuela de Puertecitos con el propósito de corroborar que los intercambiadores de calor geotérmicos propuestos no interfieran en el área ocupada por los componentes del SAATEP ni con las áreas destinadas a la recreación de los alumnos.

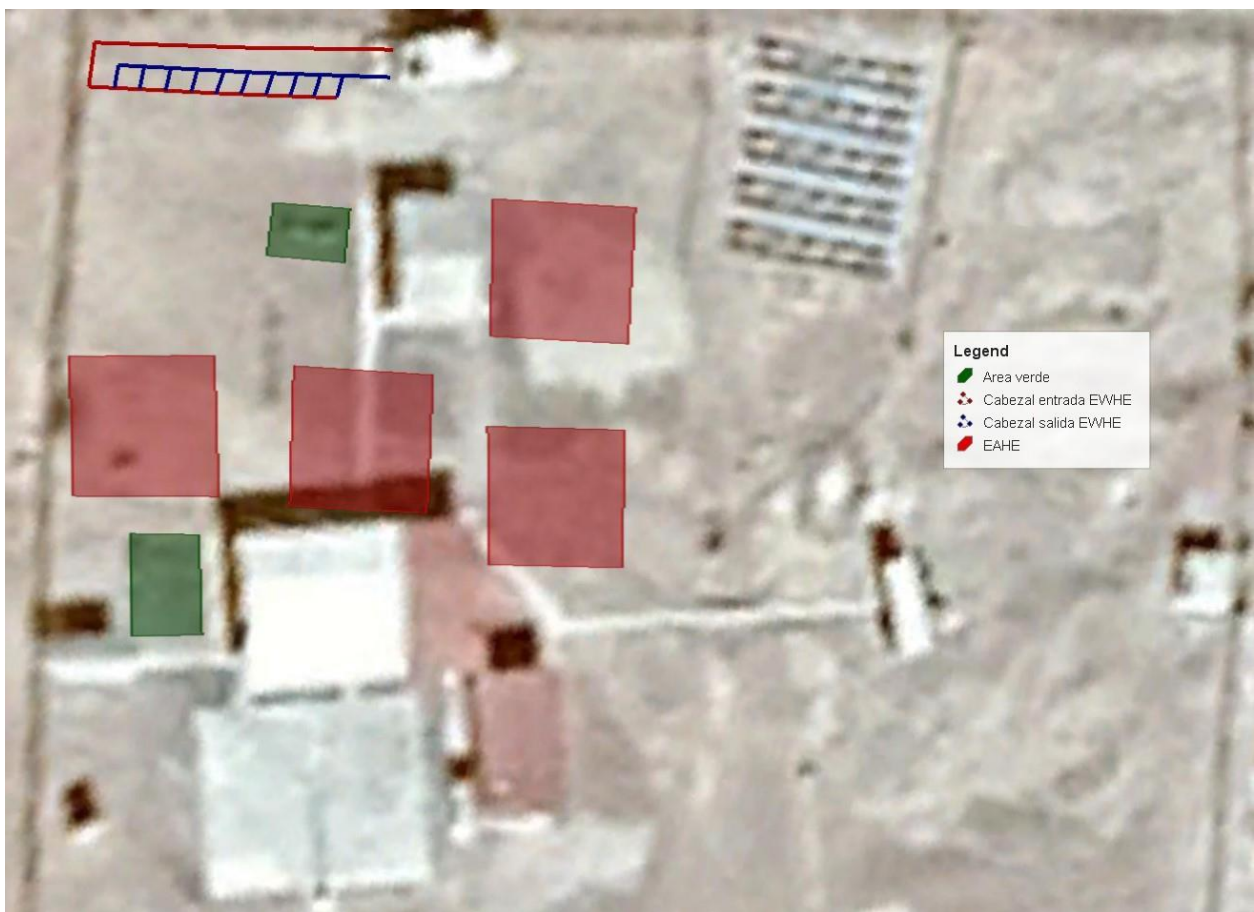


Figura 17. Área ocupada por la propuesta tecnológica (vista aérea).FUENTE: Google Earth.

3.5 Metodología para simulación de la propuesta tecnológica

La Figura 21 muestra la metodología utilizada para realizar el estudio operativo del EAHE incorporado a las aulas de la escuela de Puertecitos, la cual está basada en la utilización del software TRNSYS 17 (Solar Energy Laboratory, 2013). Esta metodología inicialmente está compuesta por tres etapas principales, las cuales se realizan en forma paralela: 1). Caracterización de las muestras de suelo, 2). Generación y procesamiento del archivo meteorológico típico de Puertecitos y 3). Levantamiento de características constitutivas de las aulas.

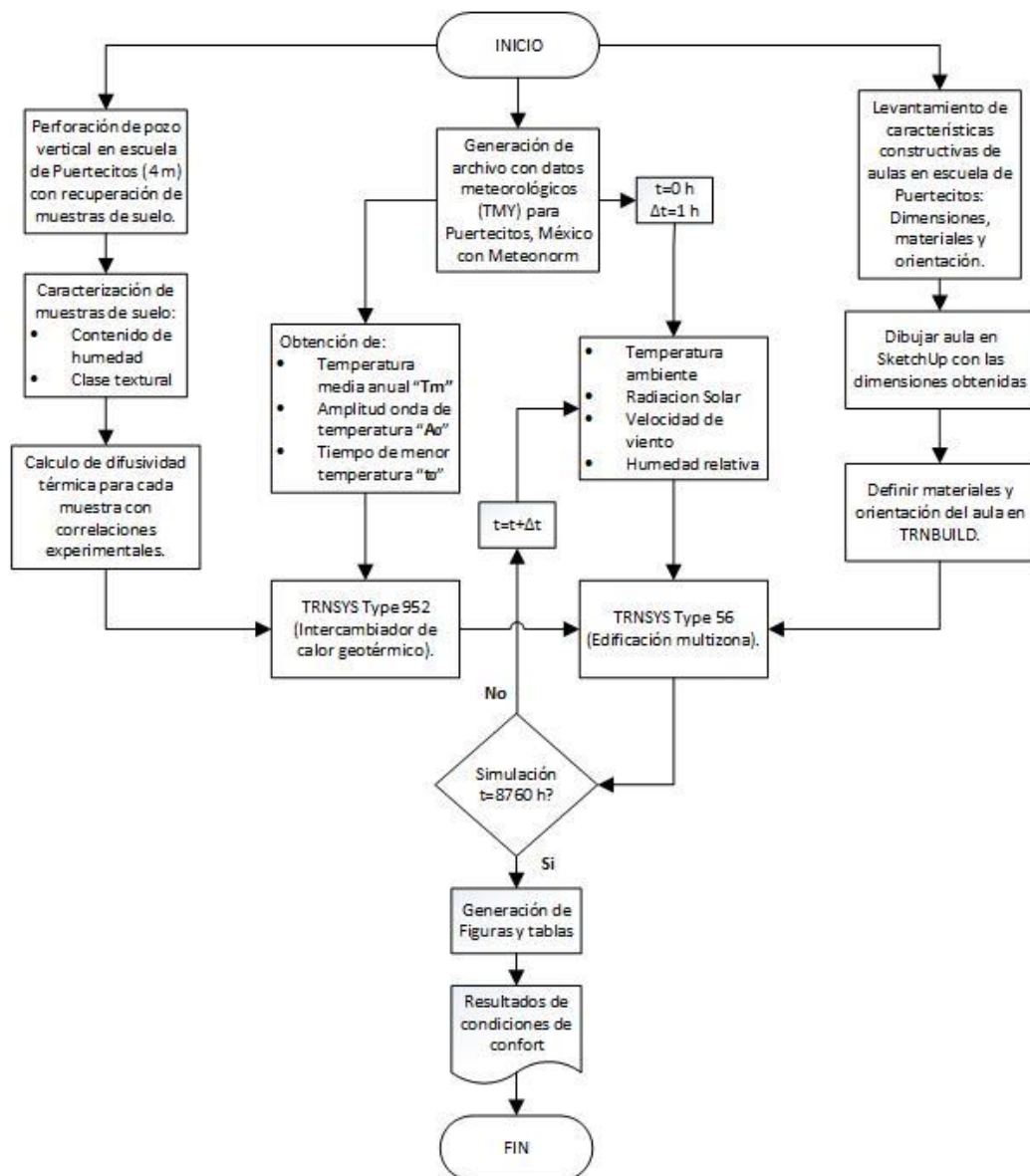


Figura 18. Diagrama de flujo de la metodología para el estudio operativo en TRNSYS.

3.6 Caracterización del subsuelo

Para adquirir mayor precisión en la estimación teórica del perfil de temperatura del subsuelo, es de importancia conocer las principales características del suelo en la zona, como la clase textural (arcilla, arena, limo), el contenido de humedad (%) y las propiedades termo físicas (calor específico " C_p " conductividad térmica " k ", densidad " ρ " y difusividad térmica " α "). Estas variables influyen directamente en el comportamiento térmico de los estratos que componen el subsuelo a una profundidad determinada.

En esta sección se presenta la metodología utilizada para realizar la perforación vertical a 4 m de profundidad en la escuela de Puertecitos, y la recuperación de muestras de suelo. A partir de 10 m de profundidad la temperatura del subsuelo presenta un valor constante, cercano al promedio anual de temperatura ambiente en el sitio (Gao et al., 2018; Ozgener et al., 2013). Otros autores han reportado que a 4 m de profundidad la variación de temperatura es cercana al 6% con respecto a la temperatura constante (Acuña et al., 2017; R. K. Singh & Sharma, 2017). Además, la profundidad de 4 m fue seleccionada considerando las características del equipo disponible para perforar. La Figura 22 muestra la perforación realizada con la técnica de rotación y empuje utilizando barrenas manuales y la recuperación de muestras en recipientes herméticos.

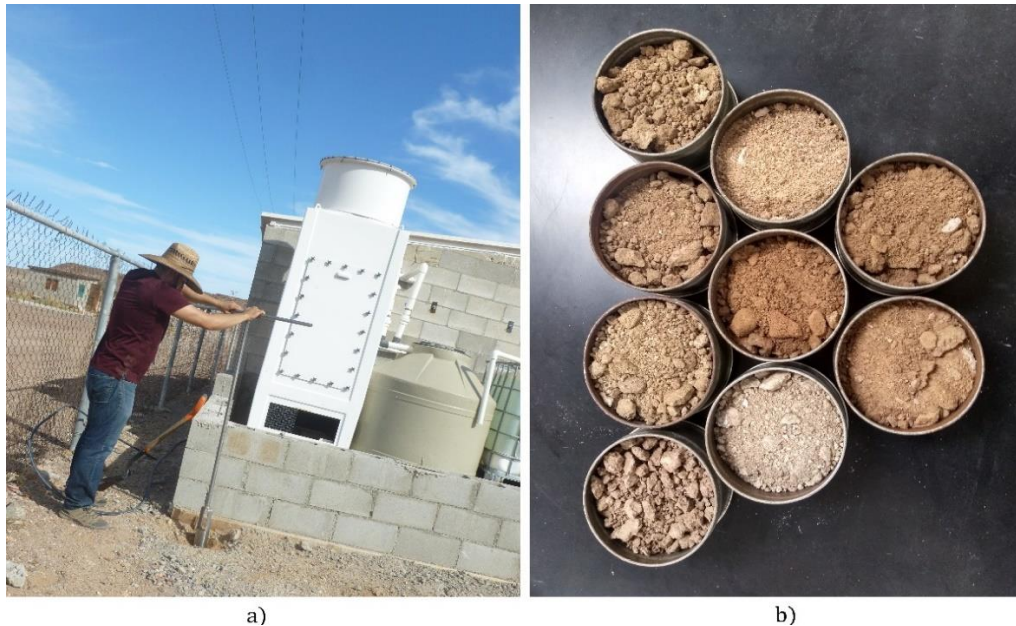


Figura 19. a) Perforación manual de pozo vertical (4 m) b) Muestras de suelo recuperadas durante la perforación.

Cabe mencionar que el pozo está ubicado frente a la torre de enfriamiento y la salida de agua del circuito de enfriamiento que se pretende enviar al subsuelo.

Simultaneo a la perforación se recuperaron muestras representativas de las diferentes columnas litológicas presentes en el pozo, los cambios de suelo fueron inferidos cuando el suelo extraído a diferentes profundidades presentó cambios de coloración y/o textura como muestra la Figura 23. En total fueron nueve las muestras extraídas y almacenadas en recipientes metálicos herméticos, con la finalidad de mantener sus condiciones iniciales hasta el momento de realizar las pruebas de contenido de humedad y el análisis de textura descritos posteriormente en este capítulo.



Figura 20. Cambio de coloración y textura de muestras de suelo recuperadas en pozo vertical Puertecitos.

Una vez alcanzada la profundidad deseada (4 m) se colocaron 4 sensores de temperatura modelo TMC20-HD (50 ft) agua/suelo a las profundidades de 1, 2, 3 y 4 m. El cable del sensor fue colocado dentro de tubería PVC de 1" como se muestra en la Figura 24. Ambos extremos fueron sellados con un tapón para PVC 1" con la finalidad de protegerlos de factores meteorológicos durante su estancia en el subsuelo. Los tapones ubicados en cada extremo fueron perforados con una broca de 0.0802 m (3/16 in) para permitir el cruce de los extremos del cable. De modo que la punta metálica de cada sensor quedó al descubierto, para permitir el contacto directo con el subsuelo y el otro extremo (punta de conexión) se llevó hasta el adquisidor de datos marca HOBO modelo UX120-006M ubicado en el cuarto de operación del SAATEP.



Figura 21. Sonda con sensores de temperatura para monitoreo en el subsuelo de Puertecitos.

El pozo fue rellenado con el mismo suelo que se extrajo durante su perforación sin agregar ningún tipo de tratamiento térmico, con la finalidad de poner a cada sensor de temperatura en contacto directo con el suelo original minimizando los efectos por perturbación. Al finalizar la instalación se dejó aproximadamente un metro de cabezal a cada sensor como se muestra en la Figura 25, con la finalidad de facilitar su recuperación en caso de desmontar el pozo de monitoreo.



Figura 22. Sondas de temperatura con cabezal.

Posteriormente, se conectaron los cuatro sensores de temperatura de cada pozo al adquisidor de datos marca HOBO modelo UX120-006M 4-channel que fue colocado dentro del cuarto de control del SAATEP.

con la finalidad de resguardarlo de factores externos como condiciones meteorológicas y/o vandalismo (Figura 26). El adquisidor de datos fue programado para realizar mediciones cada 10 minutos, prolongando su memoria hasta 359 días. La descarga de datos se realiza en campañas programadas cada 2 meses aproximadamente.



Figura 23. a) Colocación del adquisidor de datos en el cuarto de control del SAATEP. b) Adquisidor de datos puesto en marcha.

En las siguientes subsecciones, se presentan las metodologías utilizadas para realizar el análisis de clase de textura, la prueba de contenido de humedad por gravimetría y el cálculo de la difusividad térmica a las muestras recuperadas en la perforación (4 m) realizada en las inmediaciones de la escuela de Puertecitos. También se incluye la metodología utilizada para la estimación teórica del perfil de temperatura en el subsuelo.

3.6.1 Análisis de textura

Para llevar a cabo la determinación de clase textural de cada muestra de suelo recuperada durante la perforación en la escuela de Puertecitos, se utilizó el Método del hidrómetro. El método del hidrómetro fue desarrollado en 1927, en el trabajo reportado por George John Bouyoucos en 1962 (Bouyoucos, 1962) se propone una mejora y se describen los cálculos, materiales, procesos y sustancias requeridas para llevarlo a cabo. Este método es ampliamente usado para el análisis de tamaño de partículas de suelos,

hasta la fecha es el método oficial de la Sociedad Americana para Prueba de materiales (ASTM International, 2017) y la Oficina de Vías Públicas de E.U.A.

3.6.2 Contenido de humedad por gravimetría

El cálculo del contenido de humedad en las muestras de suelo recuperadas durante la perforación del pozo vertical en Puertecitos fue realizado utilizando el método de gravimetría. El método gravimétrico es ampliamente usado a pesar del surgimiento de instrumentos sofisticados para la medición del contenido de humedad en suelos, de hecho, este método es usado como referencia de calibración para nuevos instrumentos. Su procedimiento consiste básicamente en pesar la muestra contenida en el recipiente metálico en las condiciones a las que fue extraída, posteriormente se expone a un secado en horno a temperaturas de 105-110 °C por 24 horas, y finalmente se vuelve a pesar la muestra. La diferencia entre el peso con humedad y el peso de la muestra seca es el contenido de humedad, el cual puede expresarse en porcentaje o en unidades de masa (Reynolds, 1970a). Para más detalles consultar (Reynolds, 1970b, 1970c).

3.6.3 Propiedades termo físicas del subsuelo

La difusividad térmica “ α ” (m^2/s) es el resultado de la conductividad térmica “ k ” (W/m °C) dividida entre el calor específico “ C_p ” (kJ/kg °C) multiplicado por la densidad “ ρ ” (kg/m^3). En ausencia de instrumentos para medir directamente cualquiera de estas 4 variables, se optó por recurrir a correlaciones experimentales reportadas en la bibliografía.

La clase textural y el contenido de humedad se utilizaron para calcular la difusividad térmica a partir de correlaciones experimentales, desarrolladas para diferentes clases texturales en función del contenido de humedad reportadas por (Arkhangelskaya & Lukyashchenko, 2017).

$$\alpha(\theta) = \alpha_0 + \gamma \exp \left[-0.5 \left(\frac{\ln(\frac{\theta}{\theta_0})}{b} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Donde α_0 es la difusividad térmica correspondiente a ese tipo de suelo sin humedad, γ es la diferencia entre la máxima difusividad térmica a un contenido de humedad θ_0 y la difusividad sin contenido de humedad, b es una constante dependiente del tipo de suelo.

3.6.4 Perfil de temperatura del subsuelo

El perfil de temperatura del subsuelo es de interés para diferentes estudios en las áreas de agricultura, arquitectura e ingeniería. Debido a los requerimientos técnicos y económicos que conlleva realizar un monitoreo de temperatura experimental en un pozo/excavación, algunos autores han desarrollado diferentes modelos matemáticos validados experimentalmente que describen la variación anual de la temperatura del subsuelo para una profundidad determinada (Krarti et al., 1995; Mihalakakou et al., 1997; Ozgener et al., 2013).

Es posible realizar estimaciones para obtener el perfil de temperatura del subsuelo utilizando una ecuación propuesta por (Hillel, 1982). Esta ecuación representa la variación periódica de la temperatura del suelo para una profundidad determinada.

$$T_{(z,t)} = T_m + A_0 e^{(-z/d)} \text{sen}\left[2\pi(t - t_0) - \frac{z}{d} - \frac{\pi}{2}\right] \quad (2)$$

Donde T_m representa la temperatura media anual del ambiente (°C), z la profundidad en metros (m), t el tiempo en horas (h), A_0 es la amplitud en la onda de temperatura ambiente (°C), d es la profundidad de amortiguamiento. t_0 es el tiempo en el que sucede la menor temperatura del año (h).

La profundidad de amortiguamiento puede calcularse utilizando la siguiente ecuación.

$$d = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (3)$$

donde α es la difusividad térmica del suelo (m²/s).

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (4)$$

donde k representa la conductividad térmica (W/m*K), ρ la densidad (kg/m³) y C_p el calor específico (kJ/kg*K) correspondientes al suelo del sitio en estudio, las cuales

pueden ser determinadas experimentalmente o calculadas con las ecuaciones presentadas en la sección anterior. La variable ω representa la frecuencia de la onda de temperatura y se calcula como sigue.

$$\omega = \frac{2\pi}{P} \quad (5)$$

donde P representa el periodo, que equivale al tiempo total de la proyección de la onda de temperatura, por lo regular se usa el tiempo total de un año, el cual puede utilizarse en días (365), horas (8760), minutos (525,600) o segundos (31,536,000) según sea el caso de las unidades de tiempo utilizadas en la ecuación (2). Los valores T_m , A_0 y t_0 pueden obtenerse a partir del registro anual de la temperatura ambiente, como se muestra en la Figura 27.

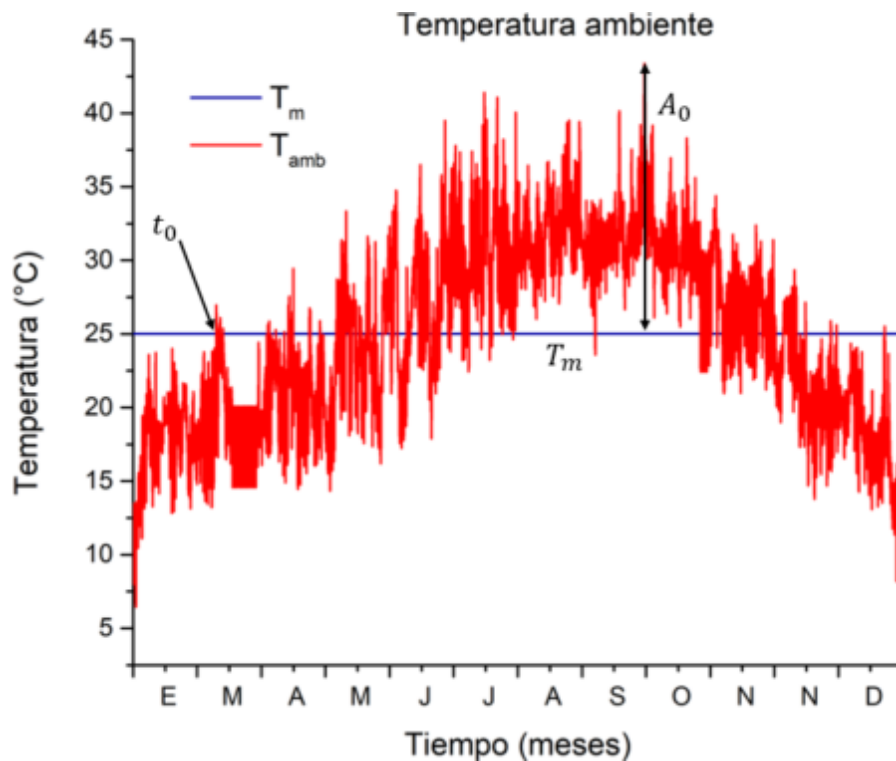


Figura 24. Variación de la temperatura ambiente.

3.7 Condiciones meteorológicas

La variación de las condiciones meteorológicas en una localidad define el comportamiento de la carga térmica de sus edificaciones, así como los límites en el desempeño de diferentes componentes de un sistema de A/C. A su vez, intervienen directamente en la perturbación del perfil de temperatura del subsuelo a profundidades someras. Por tal motivo, es importante contar con una caracterización meteorológica en las etapas iniciales de proyectos relacionados con la climatización de espacios, y en mayor medida cuando existe integración de energías renovables.

La Figura 28 muestra el equipo utilizado para el registro de temperatura ambiente, radiación solar, humedad relativa y velocidad de viento durante el año 2020 en el poblado Puertecitos. La estación meteorológica es modelo Davis Vantage Pro y está ubicada en la azotea de la Microred sustentable de servicios energéticos comunitarios del Poblado Puertecitos ($30^{\circ}21'19.7''$ N y $114^{\circ}38'26.3''$ O) la descarga de datos se realizó con el software WeatherLink. Los datos medidos fueron utilizados directamente para la simulación en TRNSYS. Por medio del software Meteonorm (METEONORM, 2014) con su opción de importar datos, se generó un archivo climático formato EPW.



Figura 25. Estación meteorológica modelo Davis Vantage Pro.

3.8 Análisis de la edificación

La carga térmica, humedad relativa y temperatura interior de una edificación son sin duda las variables con mayor importancia en el ámbito de la climatización. La carga térmica está directamente relacionada con la temperatura del aire interior que desea mantenerse en la edificación. Por otra parte, la humedad relativa y temperatura dependen de las ganancias térmicas exteriores e interiores.

Actualmente existen diversas herramientas computacionales que permiten estimar la humedad relativa y temperatura del aire al interior de una edificación, con un menor costo técnico y económico en comparación con el monitoreo termo higrométrico experimental, principalmente por la instrumentación y el tiempo requeridos.

En el campo de la arquitectura e ingeniería son utilizadas diferentes herramientas computacionales que permiten predecir el comportamiento térmico de edificaciones, los cuales, requieren la especificación de dimensiones, orientación y propiedades termo físicas de los materiales que forman la envolvente. Posteriormente utilizan archivos climáticos de la zona de estudio para simular el comportamiento de las variables meteorológicas sobre la edificación.

La mayoría de las herramientas utilizadas para modelado térmico de edificaciones están enfocadas principalmente al diseño detallado de la envolvente y sus inmediaciones, por lo tanto, las posibles adecuaciones térmicas son por medio de elementos pasivos. SketchUp es un software utilizado en el campo de la arquitectura para el diseño de edificaciones. TRNSYS es un software utilizado en el área de ingeniería para diseño y simulación de sistemas energéticos.

Para realizar la simulación térmica de las edificaciones estudiadas en este trabajo, se utilizó una extensión del software TRNSYS llamada TRNSYS-3D desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, por sus siglas en inglés) para el Departamento de Energía (DOE, por sus siglas en inglés) de EUA. Esta extensión permite vincular el software SketchUp con TRNSYS.

Inicialmente, el usuario genera el diseño geométrico de la edificación en Sketch Up y posteriormente en TRNSYS se introducen los materiales de la edificación y el archivo climático de la zona para realizar la evaluación térmica. Adicionalmente TRNSYS permite la integración de diferentes sistemas energéticos a la edificación, como sistemas de A/C convencionales, no convencionales y sistemas de energía renovable.

Con la finalidad de evaluar el comportamiento térmico de las aulas de Puertecitos y cuantificar el potencial de su acoplamiento con los intercambiadores de calor geotérmicos propuestos, se utilizó como caso de estudio la semana con mayor temperatura ambiente registrada por la estación meteorológica de la Microred de Servicios Energéticos de Puertecitos.

Para evaluar la propuesta tecnológica bajo un escenario crítico, se seleccionó la semana con mayor temperatura ambiente dentro del periodo escolar, dado que el SAATEP permanece suspendido durante el periodo de vacaciones y fines de semana.

3.8.1 Aulas escuela Puertecitos

La escuela de Puertecitos ($30^{\circ}21'2''$ N y $114^{\circ}38'3''$ O) actualmente cuenta con 4 aulas de clases, tres destinadas al nivel primaria y una para preescolar. Las tres aulas de primaria están unidas con muros adyacentes en dirección este-oeste, como muestra la Figura 29.



Figura 26. Aulas para Primaria en escuela Puertecitos.

Por otra parte, el aula de preescolar se encuentra separado 15 m en dirección norte con respecto a las aulas de primaria (Figura 30)

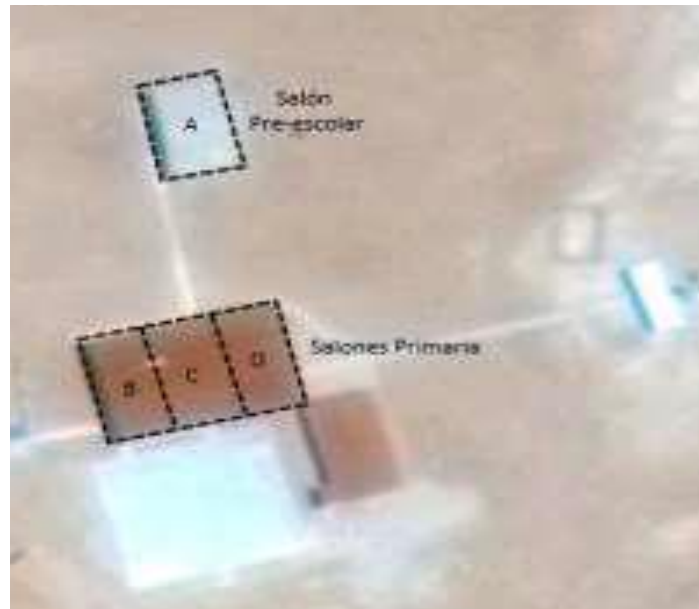


Figura 27. Vista aérea de aulas en escuela Puertecitos.

Cada aula de la escuela Puertecitos cuenta con una manejadora de aire con capacidad de 2.5 ton de refrigeración, por la cual circula agua enfriada en el enfriador por absorción (10 ton). Dadas las condiciones de aislamiento que presenta el aula de preescolar (Figura 31), sus ganancias térmicas son mayores con respecto a las aulas de primaria. Por lo tanto, las condiciones de esta aula serán consideradas para la simulación como caso crítico en el estudio paramétrico y operativo de intercambiadores de calor geotérmicos.



Figura 28. Aula de Preescolar en escuela Puertecitos.

El aula de preescolar tiene 8.16 m de largo y 6.17 m de ancho. El techo está construido a dos aguas con madera reforzada, una hoja impermeabilizante y aislamiento a una altura de 3.1 m en su sección más alta y 2.5 m en su sección baja. Las ventanas son de vidrio sencillo (4 mm de espesor) y presentan 4 m de ancho por 1 m de altura, ubicadas con orientación este y oeste. Las paredes están formadas por bloque de mortero cemento arena y una capa de emplaste. El piso cuenta con loseta en la sección interior seguida por una capa de emplaste colocada sobre una losa de concreto. La Tabla 3 muestra el resumen de las características de los materiales utilizados para la construcción del aula.

Tabla 2. Características constitutivas de los muros del aula de la escuela Puertecitos. (NOM-020-ENER, 2011)

| Componente | Capas | Espesor (m) | Conductividad térmica k (W/m°C) | Densidad ρ (kg/m ³) | Calor específico C_p (kJ/kg°C) |
|------------|--------------------|-------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Pared | Emplaste | 0.01 | 1 | 1918 | 0.795 |
| | Bloque | 0.2 | 1.64 | 2011 | 0.91 |
| | Emplaste | 0.01 | 1 | 1918 | 0.795 |
| Piso | Loseta | 0.02 | 1.104 | 2284 | 0.8 |
| | Emplaste | 0.02 | 1 | 1918 | 0.795 |
| | Loza | 0.15 | 1.77 | 2297 | 0.921 |
| Techo | Tryplay | 0.025 | 0.1155 | 544 | 1.213 |
| | Hoja a prueba agua | 0.01 | 0.14 | 934 | 1.507 |

Además de las ganancias térmicas por factores climáticos, se consideraron ganancias térmicas por un equipo de cómputo (130 W), 4 barras de iluminación artificial (72 W) y por 10 personas sentadas realizando actividades de escritorio (1000 W).

3.9 Simulación de intercambiadores de calor geotérmicos

La mayoría de los usos directos de la geotermia utilizan tuberías enterradas para realizar intercambio de calor con el subsuelo, estas tuberías reciben el nombre de intercambiador de calor geotérmico independientemente de sus dimensiones, material o dirección de la transferencia de calor (disipación o extracción de calor).

Actualmente en México la experimentación de este tipo de tecnologías está limitada a unos pocos proyectos demostrativos y/o privados. El estudio teórico ha sido en su mayoría realizado con modelado numérico (Ramirez-Dávila et al, 2014; Xamán et al, 2014; Xamán et al, 2015; Díaz-Hernández, et al, 2020). Existen pocas herramientas enfocadas al estudio de tecnologías geotérmicas de baja temperatura, y por ende en menor cantidad aquellas que evalúen su efecto sobre el comportamiento térmico de una edificación.

Como se mencionó en la sección 4.4, TRNSYS es un software utilizado para simulación de sistemas energéticos, en su mayoría eléctricos y térmicos. Dentro de sus librerías contiene módulos (Types) que permiten simular el comportamiento de diferentes tecnologías geotérmicas como: bomba de calor geotérmica, cimientos geotérmicos, intercambiador de calor tierra-aire, suelo radiante y tanques de almacenaje enterrados.

En esta sección se presenta la metodología utilizada para el estudio paramétrico y el estudio operativo de intercambiadores de calor geotérmicos utilizando los Types 557 y 952 de TRNSYS.

El Type 952 se basa en el método de diferencias finitas en 3 dimensiones para modelar una tubería cilíndrica por la cual circula un fluido de intercambio de calor, enterrada a una profundidad uniforme con respecto a la superficie terrestre. Se considera que la tubería está formada por un material cuya conductividad térmica es conocida, y se encuentra rodeada por un suelo cuyo calor específico, conductividad térmica y densidad son conocidos.

El Type 557 se basa en el modelo de almacenamiento de conductos (DST, por sus siglas en inglés) desarrollado en el Instituto de Tecnología Lund en Suecia. El modelo

asume a una cantidad de intercambiadores de calor geotérmicos colocados uniformemente dentro de los cuales circula un fluido que realiza transferencia de calor por convección con el subsuelo. Este “Type” permite la especificación de diferentes capas de suelo circundantes al intercambiador de calor geotérmico, de las cuales debe conocerse la conductividad térmica ($W/m\ ^\circ C$) y la capacidad térmica volumétrica ($kJ/m^3\ ^\circ C$) (Pahud & Hellström, 1996).

3.9.1 Estudio Paramétrico de Intercambiadores de calor geotérmicos

Existen diferentes factores que influyen en el desempeño de un intercambiador de calor geotérmico. Algunos están relacionados con detalles de manufactura, tales como; diámetro, espesor y longitud de tubería. La profundidad a la que es incorporada en el subsuelo y el flujo que circula dentro de ella son otros factores importantes.

Por tal motivo, se presenta un estudio paramétrico con la finalidad de encontrar la configuración óptima de los intercambiadores de calor geotérmicos propuestos, operando de manera intermitente durante la semana crítica cálida del periodo escolar 2020 para el poblado Puertecitos.

Para el EAHE se varió el diámetro, flujo de aire, longitud y profundidad. Para el EWHE se varió el número de pozos, radio del pozo, profundidad y separación entre cada pozo.

3.9.2 Estudio Operativo de Intercambiadores de calor geotérmicos

Cuando se tiene la configuración y/o diseño óptimo de una propuesta tecnológica, es conveniente proceder a realizar un estudio operativo de la misma. Se estudió la propuesta tecnológica variando condiciones que influyen en su desempeño; condiciones climáticas, modos de operación, necesidades a satisfacer, etc.

Para fines de este estudio, se realizó un estudio operativo al EAHE propuesto para reducir la carga térmica de las aulas de la escuela Puertecitos, variando el horario y los días de operación de dicho sistema. Los horarios de operación establecidos fueron; 7-15 h (horario escolar) y 24 h (día completo). Además, se estudió el efecto de operar el EAHE el día domingo, con ambos horarios de operación.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Inicia el capítulo con las validaciones del perfil de temperatura en el subsuelo y del modelo utilizado para simular el desempeño térmico de los intercambiadores de calor geotérmicos en TRNSYS. Posteriormente, se presentan los resultados de la caracterización meteorológica y del subsuelo, utilizados como datos de entrada para la simulación de la propuesta tecnológica en TRNSYS. Se muestra el análisis térmico de las aulas de la escuela de Puertecitos. Finalmente se presentan los resultados del estudio paramétrico y operativo de la propuesta tecnológica.

4.1 Validación experimental

Previo a realizar la evaluación técnica de la propuesta tecnológica, con la finalidad de dar mayor certidumbre a los resultados teóricos obtenidos en este capítulo, se validó el modelo de temperatura en el subsuelo simulado por TRNSYS con datos experimentales medidos en el pozo vertical (4 m) ubicado en las inmediaciones de la escuela primaria de Puertecitos. Posteriormente, los modelos utilizados para simular los intercambiadores de calor geotérmicos propuestos en TRNSYS, fueron validados a partir de datos experimentales reportados en la bibliografía.

4.1.1 Validación del perfil de temperatura del subsuelo

Los datos experimentales fueron obtenidos con 4 sensores de temperatura modelo TMCx-HD (50 ft) agua/suelo (ficha técnica en Anexo 1), colocados a 1, 2, 3 y 4 m de profundidad en un pozo vertical perforado en la escuela de Puertecitos. Para la adquisición de datos se utilizó un registrador analógico de 4 canales marca HOBO modelo UX120-006M (ficha técnica en Anexo 1) ubicado dentro del cuarto de operación del SAATEP.

Los sensores en conjunto con el adquisidor de datos fueron calibrados con un equipo Polyscience PD07R-20-A11B previamente a su instalación en la escuela de Puertecitos. La Tabla 3 muestra el barrido de temperaturas en °C aplicado a los sensores para su

calibración. Conforme aumenta la temperatura, se incrementa la diferencia entre la temperatura de calibración y la registrada por el sensor. La máxima diferencia es de 0.2 °C y ocurre a 50 °C, sin embargo, se prevé que el subsuelo no alcance esa temperatura.

Tabla 3. Calibración de sensores de temperatura y adquisidor de datos.

| Temperatura (°C) | Sensor 1 (°C) | Sensor 2 (°C) | Sensor 3 (°C) | Sensor 4 (°C) | Error (%) |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| 25 | 24.84 | 24.88 | 24.89 | 24.89 | 0.64 |
| 30 | 29.83 | 29.87 | 29.87 | 29.89 | 0.68 |
| 35 | 34.83 | 34.85 | 34.86 | 34.87 | 0.68 |
| 40 | 39.82 | 39.82 | 39.82 | 39.82 | 0.72 |
| 45 | 44.84 | 44.82 | 44.82 | 44.82 | 0.64 |
| 50 | 49.83 | 49.8 | 49.8 | 49.81 | 0.68 |

La Figura 32 muestra los resultados de la validación experimental del perfil de temperatura en el subsuelo de Puertecitos a 4 m de profundidad. El valor de ajuste lineal R^2 es igual a 0.9893, lo cual indica que el modelo utilizado en TRNSYS para obtener la temperatura del subsuelo es representativo del fenómeno real. La mayor diferencia de temperatura entre el modelo y la medición experimental ocurre del 20 (4122 h) al 28 de junio (4312 h) y es igual a 0.43 °C.

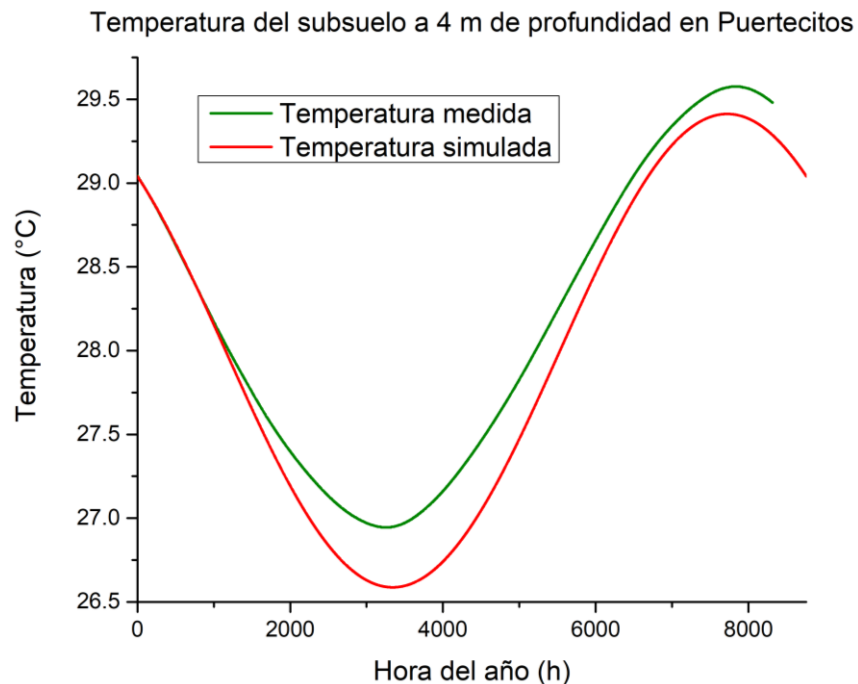


Figura 29. Validación experimental de la temperatura del subsuelo en TRNSYS.

4.1.2 Validación del modelo de intercambiadores de calor geotérmicos

Existen diferentes estudios en la literatura que utilizan TRNSYS para simular el comportamiento de intercambiadores de calor geotérmicos (Al-Ajmi et al., 2006; Baglivo et al., 2018; Congedo et al., 2020; Hasan & Noori, 2019). Con el propósito de validar los resultados del presente estudio, se realizó una simulación en TRNSYS estableciendo parámetros similares a los utilizados en el estudio experimental reportado por Bansal et al. (2010) que utilizaron una tubería cilíndrica de PVC con diámetro interior de 0.15 m y longitud de 23.42 m enterrada a una profundidad de 2.7 m para circular aire con propósitos de enfriamiento en Ajmer, India. La Figura 33 muestra una representación real de su sistema.

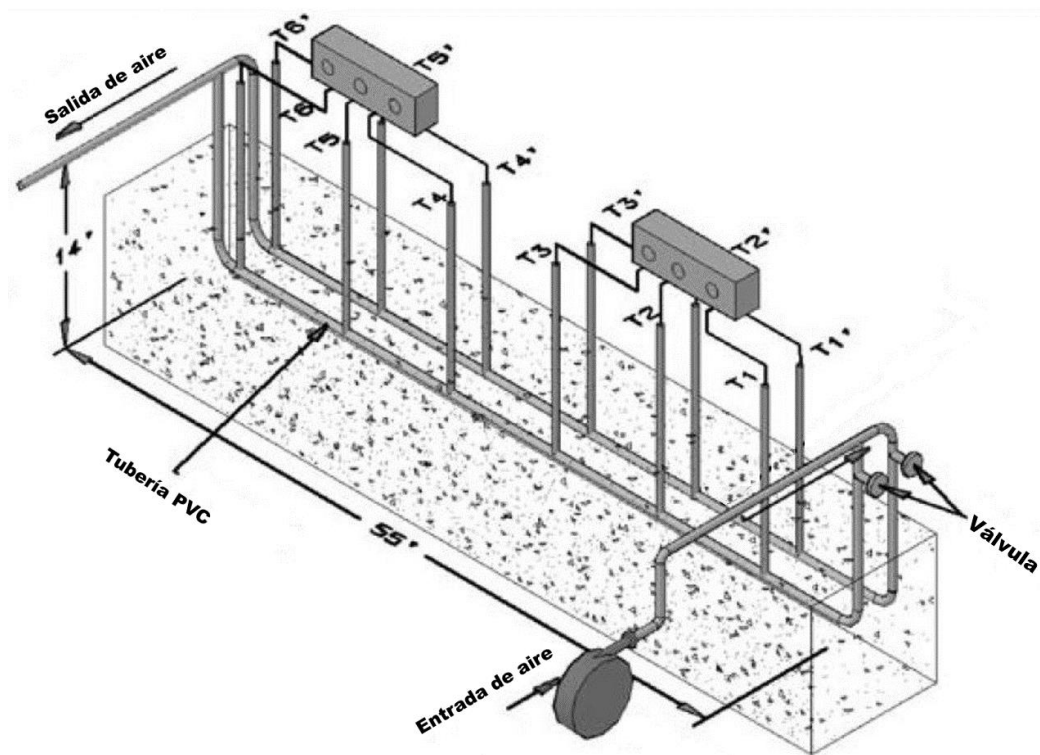


Figura 30. Configuración experimental del EAHE estudiado por Bansal et al., 2012

La Figura 34 muestra la comparación de los resultados experimentales y los simulados. El perfil de temperatura del aire a lo largo del EAHE obtenido con la simulación presenta una diferencia máxima de 1% con respecto al obtenido experimentalmente.

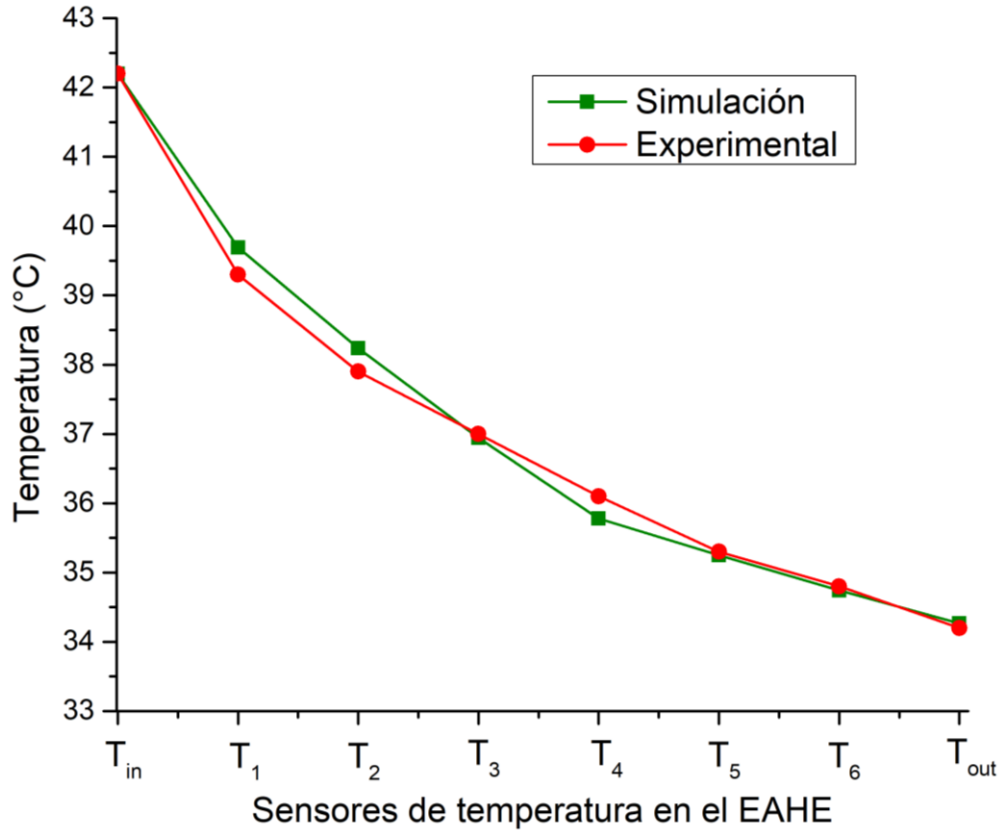


Figura 31. Validación del perfil de temperatura en el EAHE simulado contra experimental.

4.2 Características del subsuelo

Se presentan los resultados del análisis de textura, contenido de humedad y las propiedades termo físicas de cada muestra de suelo recuperada durante la perforación vertical (4 m) en la escuela de Puertecitos. También se incluye el perfil de temperatura teórico y experimental del subsuelo de Puertecitos.

4.2.1 Análisis de textura

La Figura 35 muestra el triángulo de clases texturales con los resultados de cada muestra de suelo recuperada durante la perforación en Puertecitos, de 0 a 4 m de profundidad está constituido en su mayoría por un tipo de suelo franco arcillo arenoso (Sandy clay loam), que esta presenta en la primera mitad de la perforación (0-2.1 m), esto puede relacionarse a la ubicación costera de Puertecitos, México. Una parte considerable de la segunda mitad, corresponde a un suelo franco limo (2.1-3.5 m). En la última sección se encontró un suelo arcilloso (3.7-4 m).

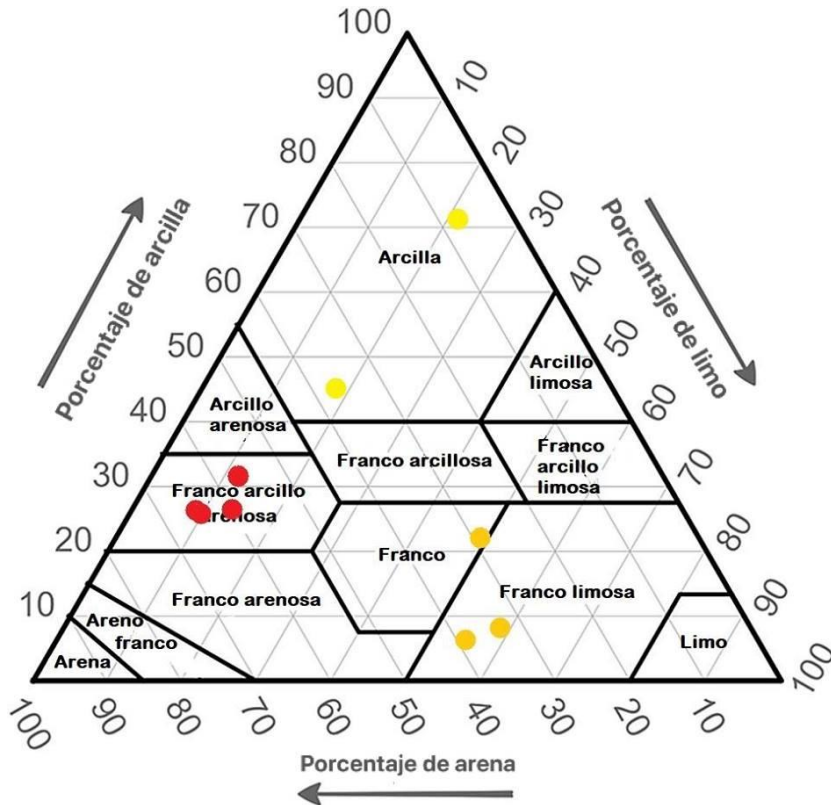


Figura 32. Triángulo de textura para muestras de suelo.

4.2.2 Contenido de humedad

Las muestras recuperadas durante la perforación realizada en las inmediaciones de la escuela de Puertecitos, presentan altos contenidos de grava. Esto se ve reflejado en un mayor porcentaje de humedad, con respecto a un suelo con bajo contenido de gravas.

Los valores de contenido de humedad para el suelo se encuentran entre el 10.75 y 37.75 %, presentando sus valores máximos a 4 m de profundidad. Cabe mencionar que a esa profundidad el subsuelo también presenta su valor máximo de contenido de grava, es posible concluir a partir de la Tabla 4, que el contenido de humedad y grava aumenta gradualmente conforme aumenta la profundidad.

A su vez la infiltración de agua marina en el subsuelo pudiera influir en su contenido de humedad a profundidades someras, que presenta valores relativamente altos considerando que no se realizan actividades de riego en las inmediaciones de la escuela.

Tabla 4. Contenido de humedad en muestras de suelo en escuela de Puertecitos.

| Muestra | Peso de Muestras (g) | | | Humedad | |
|---------|----------------------|-------------|---------|----------|----------------|
| | Con humedad | Sin humedad | Grava | Masa (g) | Porcentaje (%) |
| 1 | 170.08 | 158.59 | 63.21 | 11.49 | 10.75 |
| 2 | 152.88 | 138.35 | 76.27 | 14.53 | 18.97 |
| 3 | 174.12 | 155.67 | 77.63 | 18.45 | 19.12 |
| 4 | 154.17 | 139.25 | 46.82 | 14.92 | 13.90 |
| 5 | 173.31 | 151.56 | 59.14 | 21.75 | 19.05 |
| 6 | 159.56 | 135.13 | 75.05 | 24.43 | 28.91 |
| 7 | 163.85 | 140.09 | 88.79 | 23.76 | 31.65 |
| 8 | 182.22 | 152.27 | 102.33 | 29.95 | 37.49 |
| 9 | 172.61 | 144.01 | 117.155 | 28.6 | 37.75 |

4.2.3 Propiedades termo físicas del suelo

La Tabla 5 muestra la difusividad térmica de cada una de las muestras de suelo recuperadas durante la perforación del pozo vertical ubicado en las inmediaciones de la escuela de Puertecitos. Los valores de difusividad térmica en la primera mitad de la perforación son relativamente bajos, por el tipo de suelo y por el contenido de humedad, un suelo franco arcillo arenoso tiene un tamaño de partículas grande, esto provoca que exista menor contacto entre cada grano de suelo y por ende exista menos transferencia de calor entre ellas.

En la sección media (2.1- 3.5 m) se encuentra un suelo franco limo, el cual tiene un mayor nivel de compactación. Además, presenta niveles de humedad mayores, por este motivo presenta la difusividad máxima en comparación con el resto de profundidades, presentando valores de hasta $4.247 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$, la menor difusividad se encuentra entre 0 y 0.6 m la cual y es 53.7% menor con respecto a la difusividad máxima. En la sección final se encuentra un suelo arcilloso con difusividad térmica de $3.483 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$, que es 18% menor con respecto a la difusividad máxima.

Tabla 5. Propiedades termo físicas de muestras de suelo Puertecitos.

| Muestra | Profundidad (m) | Contenido de humedad (%) | Tipo de suelo | Difusividad térmica $\times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$ |
|---------|-----------------|--------------------------|------------------------|--|
| 1 | 0.6 | 10.75 | Franco arcillo arenosa | 1.838 |
| 2 | 0.8 | 18.97 | | 1.859 |
| 3 | 1.8 | 19.12 | | 1.859 |
| 4 | 2.1 | 19.30 | | 1.859 |
| 5 | 2.52 | 19.05 | Franco limo | 3.359 |
| 6 | 2.8 | 28.91 | | 4.135 |
| 7 | 3.5 | 31.65 | | 4.247 |
| 8 | 3.7 | 37.49 | Arcilla | 3.462 |
| 9 | 4 | 37.75 | | 3.483 |

4.2.4 Perfil de temperatura del subsuelo

En la actualidad los equipos convencionales de A/C son más utilizados para climatizar edificaciones en comparación con los sistemas geotérmicos debido a su costo, disponibilidad comercial y trivialidad. La principal limitante para la instalación de un intercambiador de calor geotérmico como sistema de climatización en edificaciones es el costo y/o requerimiento técnico para realizar la excavación/perforación.

Determinar la profundidad óptima, previo a la instalación de un sistema geotérmico evita costos innecesarios de excavación/perforación. A su vez, permite que el intercambiador de calor geotérmico tenga un mejor desempeño a lo largo de su vida útil, aumentando su eficiencia y competitividad con respecto a los sistemas convencionales de A/C.

Como se mencionó en la sección 3.6.4, existen modelos matemáticos validados experimentalmente para estimar la variación anual de la temperatura del subsuelo. En esta sección se presenta el perfil teórico y experimental de temperatura del subsuelo en Puertecitos; obtenidos con el modelo teórico propuesto por (Hillel, 1982) y con la medición experimental de temperatura en la escuela de Puertecitos, respectivamente. Posteriormente se presenta la discusión de los resultados de ambos modelos.

La Figura 36 muestra la variación teórica del perfil de temperatura en el subsuelo de Puertecitos a 1, 2, 3 y 4 m de profundidad. Los valores utilizados como datos de entrada para el modelo numérico fueron $T_m = 24.73 \text{ }^\circ\text{C}$, $A_0 = 16.53 \text{ }^\circ\text{C}$ y $t_0 = 817 \text{ h}$ los cuales se calcularon a partir de la medición experimental de temperatura ambiente con la estación meteorológica descrita en la sección 3.7.

Los valores de la profundidad de amortiguamiento “ d ” fueron calculados con la ecuación (2), utilizando como datos de entrada los valores de difusividad térmica a diferente profundidad reportados en la Tabla 5 y el periodo “ P ” en segundos (31,536,000 s). Los valores resultantes de “ d ” fueron los siguientes; Para 1 m de profundidad $d_{1\text{ m}} = 1.36 \text{ m}$, Para 2 m de profundidad $d_{2\text{ m}} = 1.37 \text{ m}$, Para 3 m de profundidad $d_{3\text{ m}} = 2.04 \text{ m}$ y Para 4 m de profundidad $d_{4\text{ m}} = 1.87 \text{ m}$.

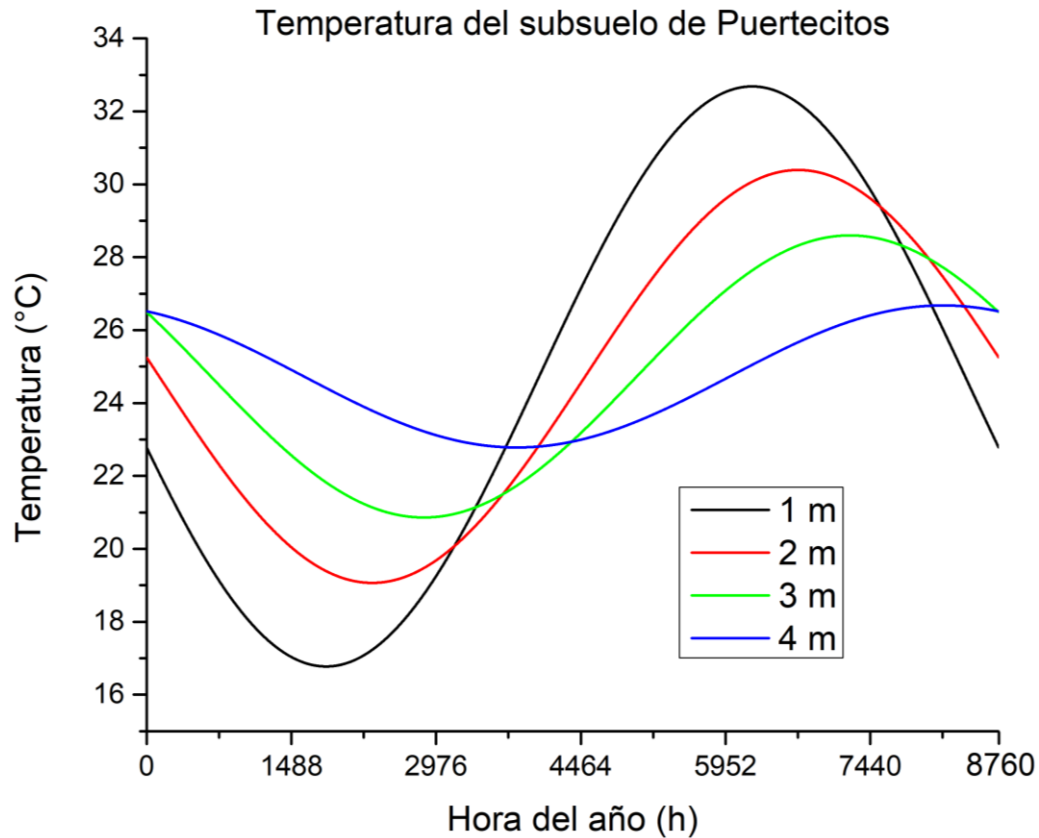


Figura 33. Perfil teórico de temperatura del subsuelo en Puertecitos.

La temperatura del subsuelo a 1 m de profundidad presenta una variación de 7.95 °C con respecto a la temperatura media $T_m = 24.73$ °C, su temperatura máxima es de 32.68 y ocurre el 16 de septiembre, justo cuando la temperatura ambiente presenta sus máximos niveles. Su similitud con la temperatura ambiente limita su uso como sumidero de calor.

La temperatura del subsuelo a 4 m de profundidad presenta 1.94 °C de variación con respecto a la temperatura media $T_m = 24.73$ °C, su temperatura máxima es de 26.67 °C y ocurre el 7 de diciembre, cuando la temperatura ambiente presenta valores cercanos a 15 °C. Esto abre la posibilidad de utilizar la temperatura del subsuelo como fuente de calor para un intercambiador de calor geotérmico. Cuando la temperatura ambiente presenta sus valores máximos (46 °C) la temperatura del subsuelo a 4 m de profundidad es de 24.76 °C, por lo tanto, vislumbra ser un sumidero de calor con alto potencial para mejorar la eficiencia de rechazo de calor en el SAATEP.

La Figura 37 muestra la variación experimental de temperatura a 1, 2, 3 y 4 m de profundidad en el pozo realizado en las inmediaciones de la escuela de Puertecitos. La profundidad de 1 m presenta una amplitud de 6.4 °C con respecto a la temperatura media del subsuelo T_m , aunque cabe mencionar que experimentalmente la T_m a 1 m de profundidad es igual a 27.78 °C, que se encuentra 3 °C por encima de la temperatura media del ambiente (24.73 °C). La variación de las condiciones meteorológicas en superficie provoca que la onda de temperatura a 1 m no sea puramente senoidal, conforme aumenta la profundidad esta variación disminuye.

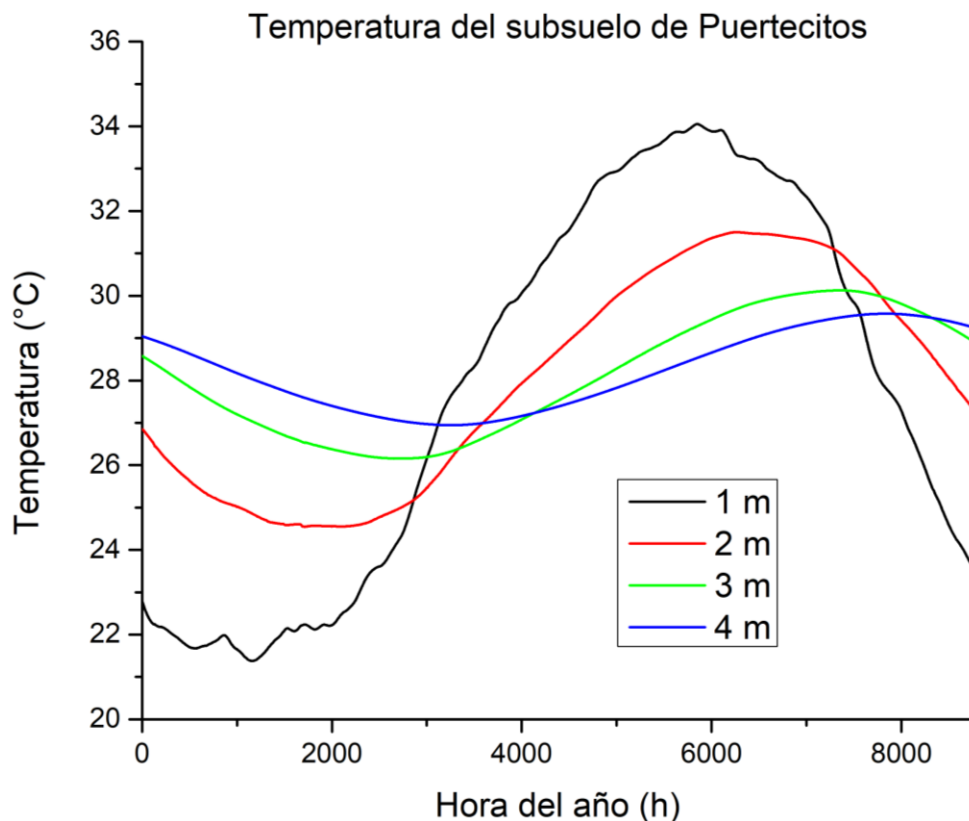


Figura 34. Perfil experimental de temperatura del subsuelo en Puertecitos.

A 4 metros de profundidad, la variación es de 1.36 °C con respecto a la temperatura media T_m , sin embargo, a esta profundidad la temperatura media incremento su valor a 28.21 °C, y se encuentra 3.5 °C por arriba de la temperatura media del ambiente (24.73 °C). Esto limita el potencial teórico como sumidero de calor que vislumbraba la Figura 36. El hecho de que la temperatura media sufra estos incrementos puede estar relacionado con la presencia de manifestaciones hidrotermales localizados a menos de 1.2 km de distancia.

4.3 Condiciones meteorológicas del sitio de estudio

Se presentan los resultados del registro y procesamiento de información obtenida en la estación meteorológica ubicada en la Microred de servicios energéticos comunitarios de Puertecitos. Los datos fueron medidos en intervalos de una hora (1 h), posteriormente se promediaron mensualmente para presentarlos como máximos, promedios y mínimos.

4.3.1 Temperatura ambiente

La temperatura ambiente promedio (anual) del lugar es de 24.73 °C, es importante mencionar que teóricamente este es el valor constante (T_m) al que tiende la temperatura del subsuelo después de cierta profundidad (< 10 - 15 m).

La Figura 38 muestra los promedios mensuales de los valores máximos, medios y mínimos de las temperaturas del aire ambiente. Para el periodo de verano la temperatura máxima registrada fue de 46 °C durante el día 3 de agosto a las 14 h, por otra parte, el periodo de invierno reporta una temperatura mínima de 8.19 °C y corresponde al día 30 de diciembre a las 5 h.

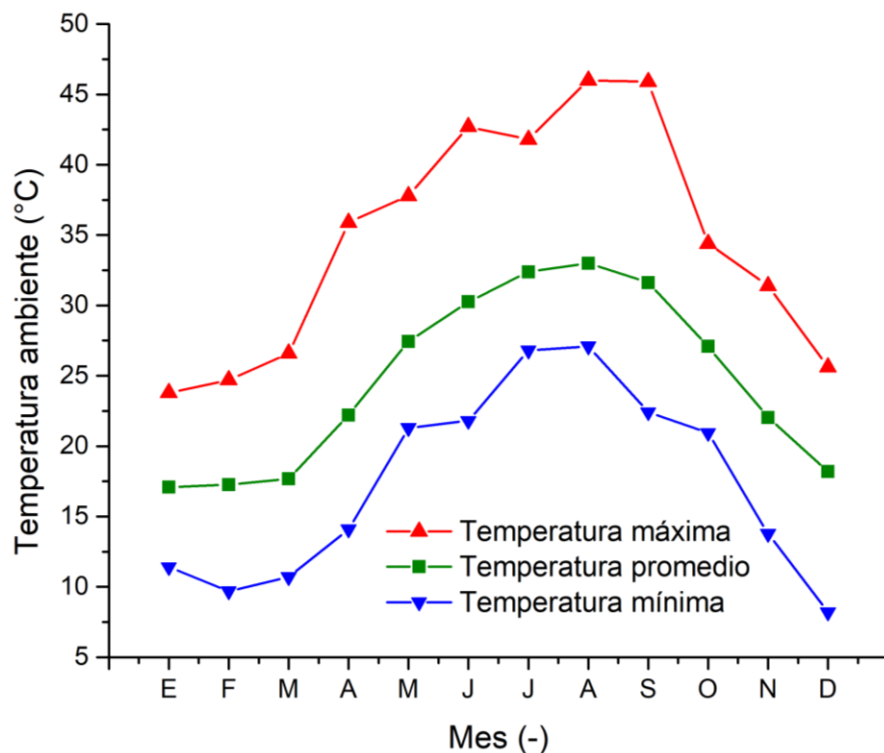


Figura 35. Promedios mensuales de temperatura ambiente en Puertecitos.

4.3.2 Radiación solar

La Figura 39 muestra que la radiación solar alcanza valores que superan los 1000 W/m² durante el final de primavera y el inicio de verano (abril-junio) presentando sus valores máximos en el mes de junio (≈ 1060 W/m²), los cuales no coinciden con los meses con mayor temperatura ambiente (Figura 38). Durante aproximadamente la mitad del año la radiación solar de la zona alcanza valores que pueden considerarse como un factor influyente en la perturbación de las temperaturas en el subsuelo, sumado a la escasa vegetación en el suelo de Puertecitos y la ausencia de sombreados durante la mayor parte del día.

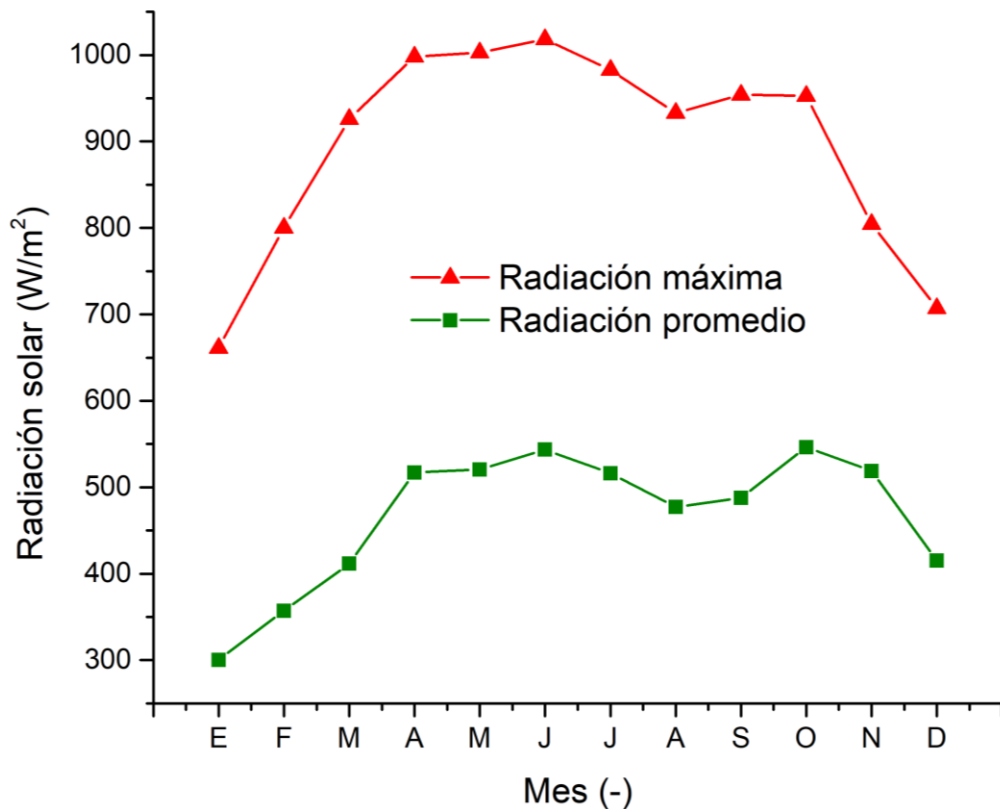


Figura 36. Promedios mensuales de radiación solar en Puertecitos.

4.3.3 Velocidad de viento

La velocidad de viento presenta sus valores máximos (≈ 16 m/s) en el mes de febrero, después presenta una tendencia a la baja que puede corroborarse con la curva de velocidades promedio. En el mes de junio se presenta una velocidad máxima de (≈ 15 m/s), también el promedio de velocidad presenta un alza de 3 a 4 m/s.

A partir de la Figura 40 también es posible apreciar que los menores valores de velocidad de viento se encuentran durante el verano, donde las máximas no exceden los 12 (m/s) y el promedio mensual se encuentra cercano a 2 m/s.

Después del mes de octubre la velocidad máxima comienza a aumentar, noviembre y diciembre presentan valores de aproximadamente 13 m/s (meses con temperatura mínima), que se mantienen en enero para presentar sus máximos niveles en febrero.

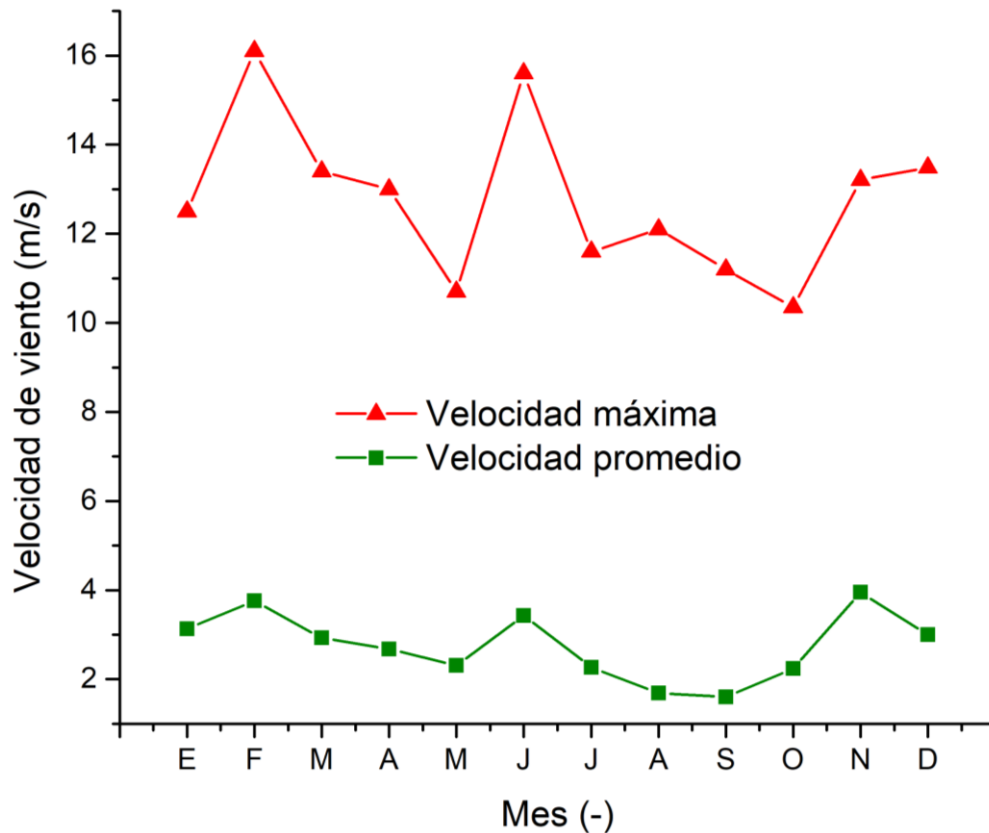


Figura 37. Velocidad de viento en Puertecitos.

4.3.4 Humedad relativa

La Figura 41 muestra que los valores máximos de Humedad relativa se oscilan entre 80 y 90 % durante todo el año a excepción del mes de marzo, donde el valor máximo registrado se encuentra cercano al 95 %. Las curvas de humedad promedio y mínima pueden validar la observación anterior, debido a que ambas presentan un notorio incremento entre el mes de febrero y el mes de marzo.

Después del mes de marzo la humedad comienza a disminuir gradualmente hasta el mes de junio. Durante el verano, los niveles de humedad aumentan nuevamente, y aunque la máxima sigue cercana al 85%, la curva promedio presenta su nivel más alto durante el mes de agosto con valores que superan el 60%. Para los meses de diciembre, enero y febrero los valores mínimos registrados no descienden más del 10 %. Es posible concluir que el mes de marzo es el mes más húmedo mientras que noviembre y junio son los meses con menor nivel de humedad.

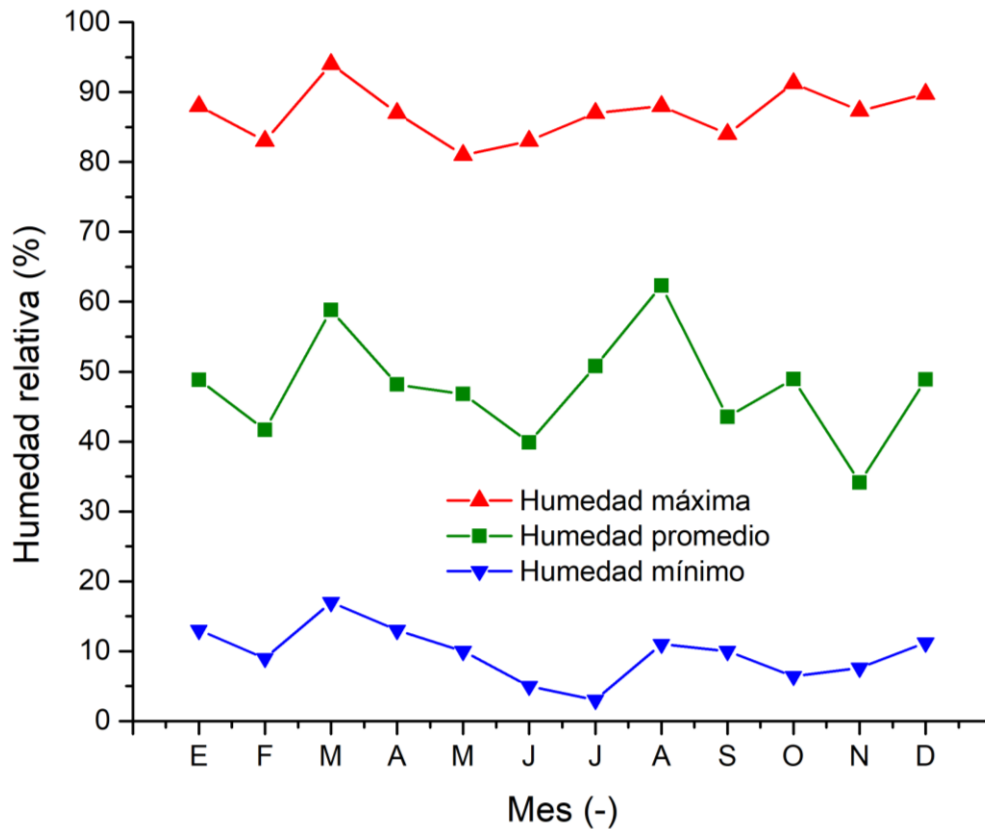


Figura 38. Humedad relativa en Puertecitos.

4.4 Análisis de la edificación

La Figura 42 muestra el comportamiento anual de la temperatura de las aulas y señala con recuadros sombreados los periodos vacacionales y los periodos que requieren servicio de calefacción o enfriamiento.

Para determinar la duración de los periodos de calefacción y enfriamiento se establecieron límites teóricos de temperatura (20 y 30 °C) representados por las líneas punteadas en la Figura 42. Estos periodos están basados en el calendario escolar establecido por la Secretaría de Educación Pública en México.

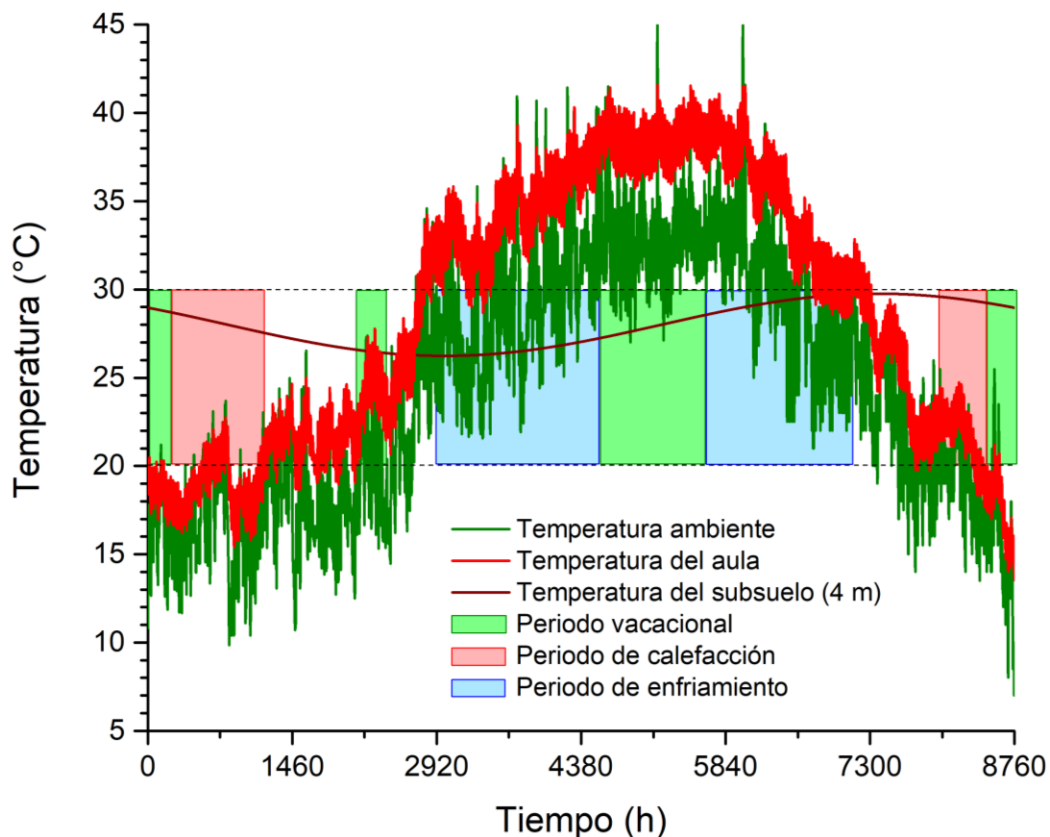


Figura 39. Variación anual de temperatura interior en el aula de la escuela Puertecitos.

El primer periodo de calefacción comienza el 11 de enero (241 h) y finaliza el 18 de febrero (1176 h), seguido por un periodo de transición del 19 de febrero (1177 h) al 1 de mayo (2905 h). Dentro de este periodo de transición ocurren las vacaciones de semana santa del 29 de marzo al 9 de abril señaladas por el primer recuadro verde (2113 – 2400 h).

El primer periodo de enfriamiento comienza el día 1 de mayo (2905 h) y finaliza el día 8 de julio (4560 h), seguida por un periodo vacacional (4561-5664 h). La segunda etapa del periodo de enfriamiento comienza el día 25 de agosto (5665 h) y termina el día 24 de octubre (7128 h).

El segundo periodo de calefacción comienza el día 29 de noviembre (7993 h) y finaliza el día 18 de diciembre (8472 h), seguido por un periodo vacacional del 19 de diciembre (8473 h) al 10 de enero (240 h).

Cabe mencionar que las temperaturas máximas y mínimas dentro del aula ocurren dentro de los periodos vacacionales de verano (4561-5664 h) e invierno (8473-240 h) respectivamente. La máxima temperatura del aula en caso de no usar sistema de A/C es de 43.89 °C y ocurre durante el día 18 de agosto (5537 h) a las 16 h. La mínima temperatura del aula en caso de no usar sistema de calefacción es de 11.84 °C y ocurre el día 25 de diciembre (8623 h) a las 6 h.

La semana crítica cálida de ambos periodos de enfriamiento corresponde a la semana comprendida entre el día lunes 24 de agosto y el viernes 28 de agosto (5665-5784 h), la cual presenta una temperatura promedio de 37.27 °C en caso de no usar sistema de A/C. La demanda térmica promedio durante esa semana es de 8.34 kW y la máxima es de 13.47 kW. Esta semana fue considerada como periodo de tiempo de simulación para evaluar el desempeño de los intercambiadores de calor propuestos, en el estudio paramétrico.

La semana con menor temperatura promedio del aula, corresponde a la semana comprendida entre el día lunes 11 y el día viernes 15 de enero (242-361 h), las temperaturas promedio y mínima que presenta el aula durante dicha semana son de 16.91 °C y 12.88°C, respectivamente.

4.5 Estudio de intercambiadores de calor geotérmicos

4.5.1 Estudio paramétrico de intercambiador de calor tierra-aire

Las simulaciones de intercambiadores de calor geotérmicos presentadas en esta subsección fueron realizadas bajo condiciones meteorológicas de la semana con mayor temperatura ambiente en el poblado Puertecitos.

Para realizar el estudio se consideró que el intercambiador de calor tierra-aire opera durante las 24 horas del día. El indicador para determinar el mejor desempeño es la tasa semanal de calor disipado al subsuelo (kWh). En la Figura 43 se presenta la tasa de disipación de calor semanal variando: diámetro (4, 6, 8 y 10") y flujo (250, 500, 750 y 1000 kg/h).

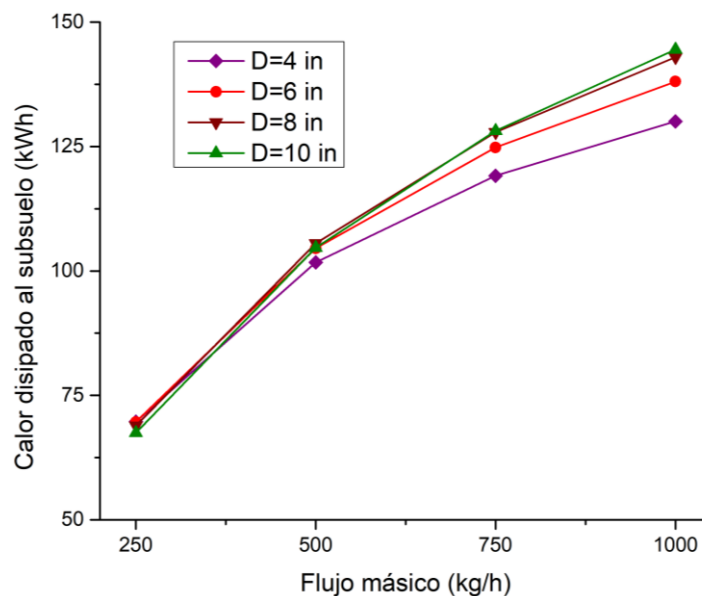


Figura 40. Variación de diámetros y flujos ($L=50$ m y $z=4$ m).

El comportamiento del EAHE no varía significativamente con la variación de diámetros. Por otra parte, la cantidad el flujo masico aumenta significativamente la capacidad de rechazo de calor al subsuelo. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la velocidad de aire es inversamente proporcional al diámetro del tubo, la velocidad de aire requerida para mantener un flujo de 1000 kg/h en un EAHE con diámetro de 4, 6, 8 y 10 in es de 28.55, 13, 7.36 y 4.71 m/s respectivamente, considerando una densidad de aire promedio de 1.2 kg/m^3 . En caso de no considerar este factor durante el dimensionamiento de un

EAHE puede afectar directamente en la selección del equipo encargado de circular el aire. La Tabla 6 muestra los valores de disipación de calor semanal representados en la Figura 43.

Tabla 6. Variación de disipación de calor semanal con diferentes diámetros.

| Calor disipado al subsuelo [kW/sem] (L=50 m y z=4 m) | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|
| \dot{m} \ Φ | 4" | 6" | 8" | 10" |
| 250 (kg/h) | 69.71 | 69.63 | 68.89 | 67.46 |
| 500 (kg/h) | 101.73 | 104.54 | 105.53 | 104.67 |
| 750 (kg/h) | 119.13 | 124.81 | 127.87 | 128.18 |
| 1000 (kg/h) | 130.05 | 138.07 | 142.97 | 144.48 |

La Figura 44 presenta la tasa de disipación de calor semanal variando: longitud (25, 50, 75 y 100 m) y profundidad (1, 2, 3, 4 y 5 m). Se consideró un EAHE con diámetro de 6", debido a que en general tiene un desempeño similar a 8 y 10" y la velocidad requerida es de 9.8 m/s que puede obtenerse con equipos comercialmente disponibles.

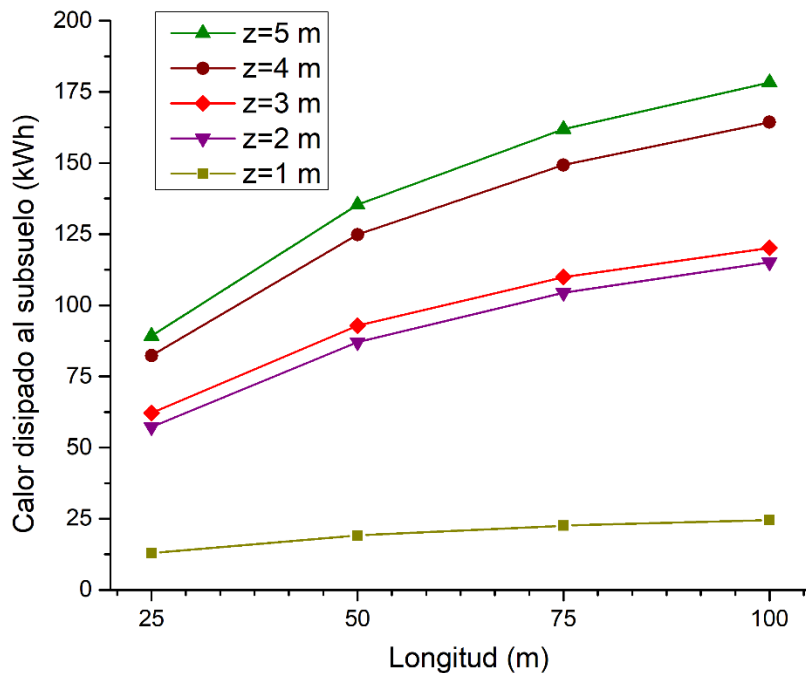


Figura 41. Variación de longitudes y profundidades ($\Phi=6$ in, $\dot{m}=750$ kg/h).

El incremento de longitud genera un aumento proporcional en la tasa de calor disipado al subsuelo, por este motivo, la selección de la longitud de un EAHE puede basarse en mayor medida en la cantidad de espacio y recurso disponible para su instalación. Los

incrementos en la tasa de disipación de calor del aire al subsuelo generados por el aumento de longitud, se deben al tiempo de residencia y a la cantidad de fluido que se encuentra en el EAHE para posteriormente integrarse a la edificación. Tomando en cuenta que 25 m adicionales de longitud demandan un mayor costo de excavación y material, así como requerimiento de espacio, se determinó la longitud de 75 m como la óptima para la simulación del EAHE acoplado a las aulas de la escuela de Puertecitos.

Tabla 7. Variación de disipación de calor semanal con diferentes longitudes.

| Calor disipado al subsuelo [kW/sem] ($\Phi=6"$, $\dot{m}=750$ kg/h) | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|--------------|
| L \ z | 25 m | 50 m | 75 m | 100 m |
| 1 m | 12.90 | 19.12 | 22.56 | 24.58 |
| 2 m | 57.25 | 87.08 | 104.42 | 115.15 |
| 3 m | 62.10 | 92.79 | 109.94 | 120.21 |
| 4 m | 82.35 | 124.81 | 149.28 | 164.33 |
| 5 m | 89.29 | 135.35 | 161.89 | 178.24 |

Colocar el EAHE a una profundidad 1 m provoca que tenga un bajo desempeño. La Tabla 7 muestra que la tasa de disipación de calor semanal es considerablemente menor en comparación con el resto de profundidades (2, 3, 4 y 5 m), esto se debe a que una profundidad cercana a la superficie existe mayor influencia de las condiciones meteorológicas sobre el subsuelo y durante periodos de tiempo el aire que circula dentro del EAHE presenta ganancias de calor. Al situarlo a una profundidad de 2 m la tasa de retiro de calor aumenta aproximadamente 200%. Utilizar una profundidad de 5 m continúa mejorando el desempeño del intercambiador, pero la ganancia es mínima en comparación con su desempeño a 4 m de profundidad. Además, es importante considerar los costos técnicos y económicos que conlleva realizar una excavación con 5 m de profundidad, por este motivo se seleccionó la profundidad de 4 m como la óptima para enterrar el EAHE en las inmediaciones de la escuela de Puertecitos.

4.5.2 Estudio paramétrico de intercambiador de calor tierra-agua

Para analizar el desempeño anual del intercambiador de calor tierra-agua propuesto, se realizó un estudio paramétrico variando el número de EWHE en paralelo, radio de perforación, longitud vertical (profundidad) del EWHE y distancia de separación entre cada EWHE.

La Figura 45 muestra que tanto el número de pozos y su profundidad influyen considerablemente en la tasa de calor disipado durante el periodo de enfriamiento por parte del EWHE propuesto. A simple vista seleccionar la perforación de 20 pozos a una profundidad de 100 m parece la mejor opción, sin embargo, aumentar la profundidad de perforación incrementa el costo económico y el riesgo de derrumbe del pozo, dado que el subsuelo está compuesto en su mayoría por suelo no consolidado. Además, el fenómeno observado en la sección 5.3.4 pudiera magnificarse a mayor profundidad.

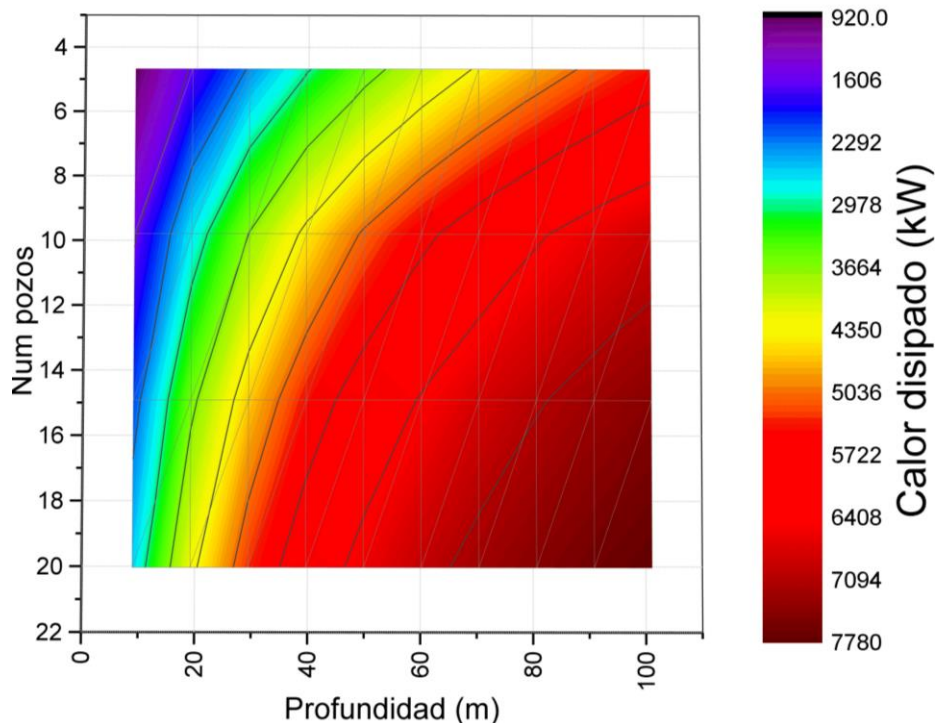


Figura 42. Variación de número de pozos y profundidad.

La Tabla 8 muestra que a partir de 50 m de profundidad el incremento en la tasa de calor disipado es menor al 10% al agregar 10 m de profundidad adicionales (50-60 m). Por tal motivo se seleccionó la profundidad de 50 m como la óptima.

También es posible determinar que el número óptimo de pozos es 10 a partir de la Tabla 8. Pasar de 5 a 10 pozos incrementa en 40% la disipación de calor del EWHE, pasar de 10 a 15 pozos y de 15 a 20 incrementa 16% y 9% respectivamente la disipación de calor por parte del EWHE.

Tabla 8. Disipación de calor con diferente número de pozos y profundidad.

| Calor disipado al subsuelo[kW/año] (Separación=2 m y Diam. perforación=0.1524 m) | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| z NP | 10 m | 20 m | 30 m | 40 m | 50 m | 60 m | 70 m | 80 m | 90 m | 100 m |
| 5 | 920.6 | 1662.4 | 2335.4 | 2940.6 | 3482.4 | 3968.9 | 4403.9 | 4788.7 | 5132.8 | 5437.2 |
| 10 | 1561.3 | 2721.7 | 3679.2 | 4460.4 | 5092.6 | 5598.3 | 6013.3 | 6347.6 | 6626.6 | 6854.6 |
| 15 | 2116.3 | 3548.5 | 4623.4 | 5418.4 | 6008.7 | 6446.6 | 6789 | 7052.8 | 7269.9 | 7443.6 |
| 20 | 2611.1 | 4215.6 | 5310.3 | 6058.1 | 6579.2 | 6951 | 7238.1 | 7455.4 | 7635.4 | 7778.6 |

La Figura 46 muestra que el impacto del radio de la perforación sobre la tasa de calor disipado es menor en comparación con la distancia de separación entre pozos. La distancia de separación entre cada pozo influye de manera considerable, esto se debe a que la alta difusividad del subsuelo hace que el calor disipado por un pozo aumente la temperatura del subsuelo circundante, limitando el rechazo de calor en el pozo contiguo. Considerando que se tiene disponibilidad de espacio en la escuela de Puertecitos se seleccionó la mayor distancia entre pozos (2 m) como la óptima.

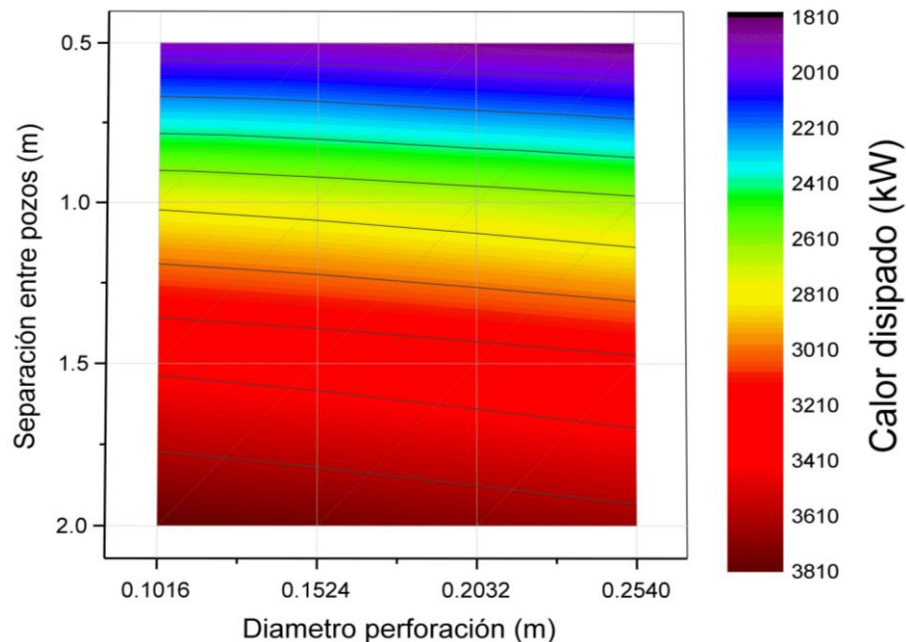


Figura 43. Separación entre pozos y diámetro de perforación.

A partir de la Tabla 9 se determinó que el diámetro óptimo es de 6 in (0.1524 m), dado que pasar de 10 in (0.254 m) a 8 in (0.2032 m) incrementa 1.67% la tasa de disipación de calor, pasar de 8 in (0.2032 m) a 6 in (0.1524) incrementa 1.63% la tasa de disipación de calor, pero el incremento en la tasa de disipación de calor es menor a 1.2 % al disminuir el radio de perforación de 6 in (0.1524) a 4 in (0.1016 m). Además, entre menor sea el radio de perforación, menor es el impacto ambiental por cambio de uso de suelo.

Tabla 9. Disipación de calor semanal con diferentes longitudes.

| Calor disipado al subsuelo [kW/año] (Np=10, z=30 m) | | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| Φ | 0.1016 m | 0.1524 m | 0.2032 m | 0.254 m |
| Sep | | | | |
| 0.5 m | 1915.9 | 1897.4 | 1850.7 | 1811.1 |
| 1 m | 2781.8 | 2743.2 | 2695.5 | 2643.8 |
| 1.5 m | 3378.7 | 3338.5 | 3290.7 | 3240 |
| 2 m | 3804.7 | 3762.7 | 3715.4 | 3666.8 |

Basándose en la Tabla 9 también es posible corroborar y cuantificar la conclusión cualitativa realizada a partir de la Figura 46, donde se determinó la separación de 2 m como la óptima. Separar los pozos a 1 m de distancia incrementa en 45% la disipación de calor en comparación con 0.5 m de separación. Al incrementar de 1 a 1.5 m la distancia de separación la disipación de calor aumenta en 22%. Finalmente, pasar de 1.5 a 2 m de separación, incrementa 12% la disipación de calor. Por este motivo, se seleccionó 2 m como la óptima, considerando que aumentar de 2 a 2.5 m incrementará menos de 10% la disipación de calor y que entre más separación exista entre cada pozo requerirá más tubería para formar el arreglo en paralelo.

4.5.3 Estudio operativo de intercambiador de calor tierra-aire

Durante los dos periodos cálidos, el EAHE opera bajo dos modos de operación. Cuando el SAATEP opera por debajo de su capacidad nominal, el EAHE ayuda a reducir la carga térmica del aula, operando de 0 a 7 y de 15 a 24 h. En los días pico del periodo cálido, cuando la demanda térmica del aula es mayor en comparación con la capacidad nominal del enfriador por absorción, el EAHE trabaja 24 h.

Durante el periodo de calefacción la escuela de Puertecitos no cuenta con otro sistema de calefacción, por tal motivo, el EAHE opera de manera independiente. Se estudiaron diferentes horarios de operación 7-15 h (horario escolar) y 24 h (día completo).

MODO ENFRIAMIENTO

La Figura 47 muestra el comportamiento térmico del aula durante la semana crítica (4441-4560 h) del primer periodo cálido (mayo-julio). Se estudió el impacto adicional en la disminución de carga térmica causado por la operación del EAHE durante 24 h los domingos.

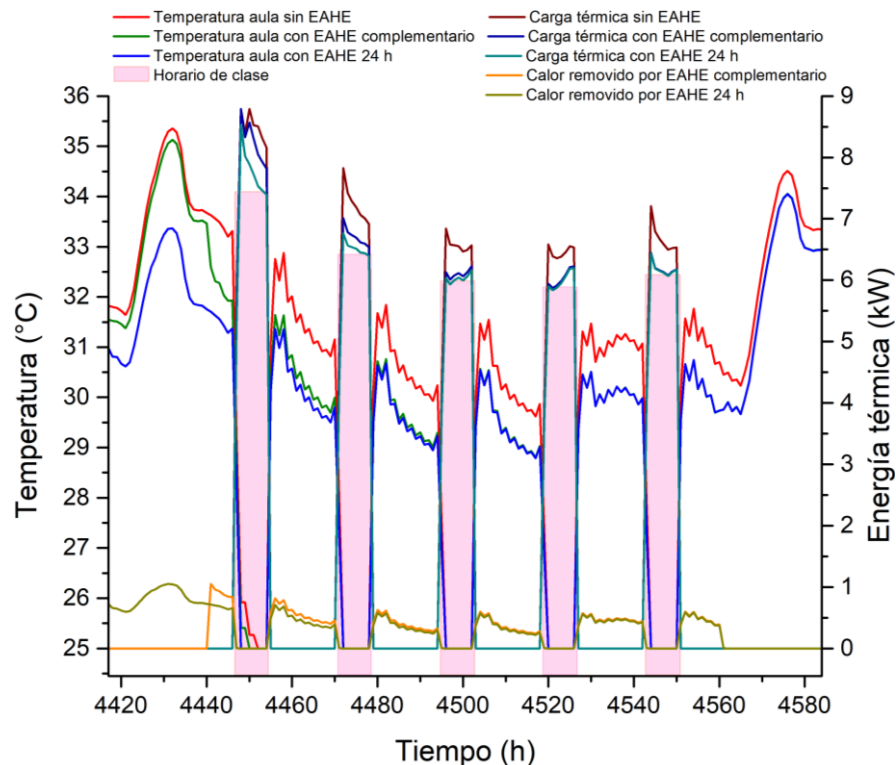


Figura 44. Dinámica térmica del aula durante la semana crítica del periodo mayo-junio.

Utilizar el EAHE en modo complementario (0-7 y 15-24 h) de lunes a viernes evita el consumo de 16.3 kWh de enfriamiento y con esto, reduce el 6% de la carga térmica semanal. En términos del consumo energético del SAATEP, representa un ahorro de 86.1 kWh de energía térmica que representan 29.9% del consumo semanal de calor auxiliar.

Cuando el EAHE opera 24 h el día domingo, la temperatura del aula se reduce 3 °C el día lunes al inicio de clases (7 h) en comparación con el aula sin EAHE, esto genera un ahorro de 22.3 kWh de enfriamiento que representan el 8.25% de la carga térmica semanal. En términos del consumo energético del SAATEP, esto representa un ahorro de 118.9 kWh que representan 41.3% del consumo semanal de calor auxiliar, como se muestra en la Figura 48.

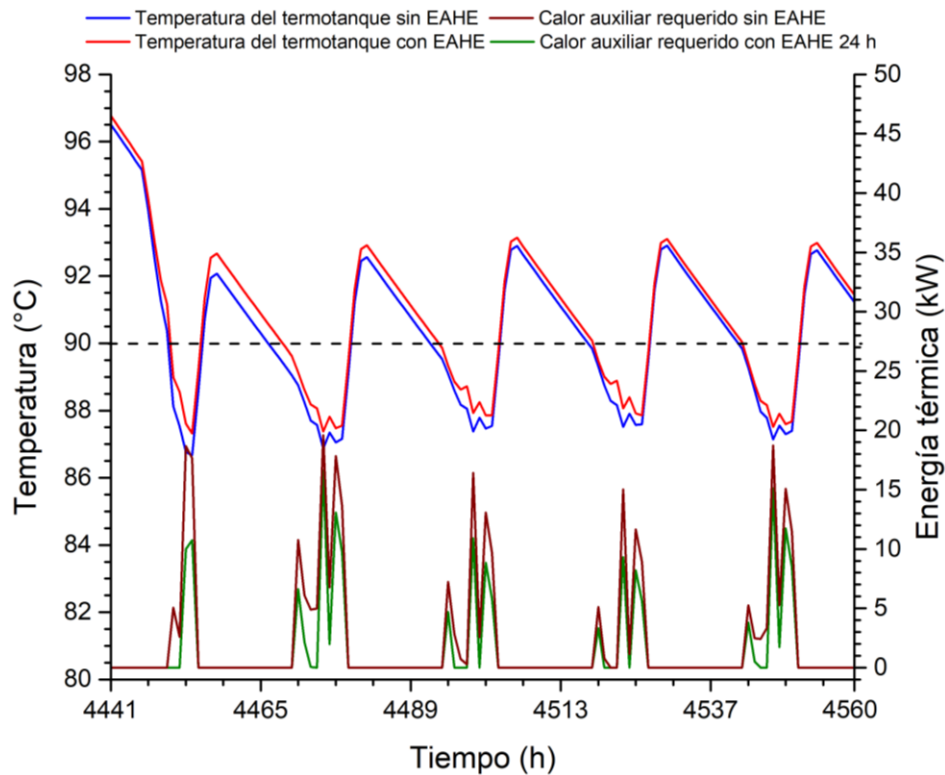


Figura 45. Comportamiento del SCAES durante la semana crítica del primer periodo cálido.

Mantener el EAHE operando en modo complementario incluyendo domingos 24 h durante todo el primer periodo de enfriamiento (2905-4560 h) genera una reducción de carga térmica total de 154.7 kWh que representan el 7.3% de la energía térmica a retirar.

También reduce el consumo de 337 kWh de calor auxiliar que representan 57% del consumo total durante este periodo.

La Figura 49 muestra el comportamiento térmico del aula durante la semana más cálida (5665-5784 h) del periodo agosto-octubre. En caso de no usar EAHE u operarlo en modo complementario el aula no alcanza condiciones de confort durante el día lunes a pesar de operar con la capacidad nominal del SAATEP.

Operar el EAHE de manera complementaria con el SAATEP durante esta semana, reduce 15.34 kWh de carga térmica que representan 4.83% con respecto al consumo total de energía térmica sin usar EAHE. El día lunes no existe ahorro de energía térmica, sin embargo, ayuda a que la temperatura del aula se acerque a condiciones de confort.

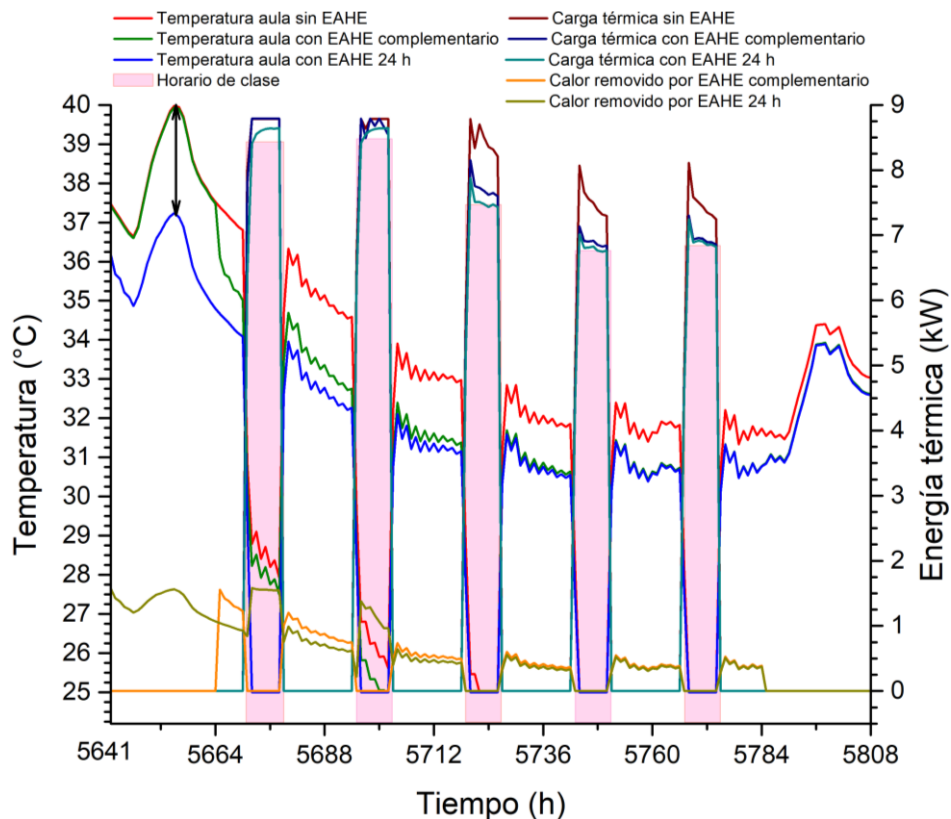


Figura 46. Dinámica térmica del aula durante la semana crítica del periodo agosto-octubre.

Además de operar el EAHE durante 24 h el día domingo para pre enfriar el aula, durante el día lunes se operó el EAHE por 24 h para apoyar al SAATEP, dado que la demanda de energía térmica es mayor que su capacidad nominal en esta semana crítica cálida. Se logró alcanzar condiciones de confort (25 °C) durante el día lunes, y una

reducción semanal de 21.6 kWh de carga térmica que representan 6.8% con respecto al consumo semanal de energía térmica sin usar EAHE. En términos del consumo energético del SAATEP, esto representa un ahorro de 89 kWh de energía térmica que representan 10.8% del consumo semanal de calor auxiliar, como se muestra en la Figura 50.

Mantener el EAHE operando en modo complementario incluyendo domingos 24 h durante todo el segundo periodo de enfriamiento genera una reducción de carga térmica total de 57.3 kWh que representan el 3% de la energía térmica a retirar. También reduce el consumo de 481 kWh de calor auxiliar que representan 13.69% del consumo total durante este periodo.

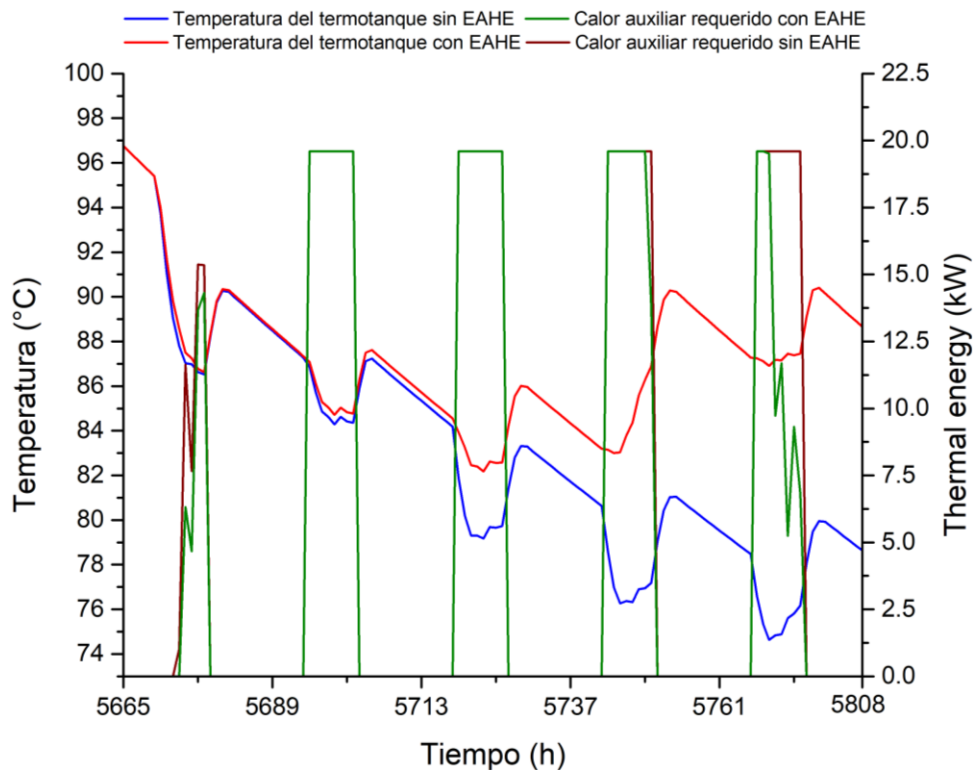


Figura 47. Comportamiento del SCAES durante la semana cálida del primer periodo de enfriamiento.

Los ahorros de carga térmica generados por la operación del EAHE se resumen en la Tabla; 11 por periodo cálido, y por ahorro anual total. Es posible determinar que el EAHE tiene un mejor desempeño en su modo de operación continuo (24 h), donde reduce el consumo de 154.7 kWh de enfriamiento, que representan el 3.9% del consumo total anual. Mientras que durante el segundo periodo cálido reduce 57.3 kWh de enfriamiento, que representan el 1.4 % del consumo total anual.

Tabla 10. Ahorro de carga térmica generado por el EAHE.

| Ahorros carga térmica | Sin EAHE | EAHE complementario (0-7 y 15-24 h) | | EAHE 24 h | |
|------------------------------|-----------------|--|------------|------------------|------------|
| Periodo | Consumo (kWh) | Consumo (kWh) | Ahorro (%) | Consumo (kWh) | Ahorro (%) |
| Mayo-Junio | 2,113.4 | 2,011.8 | 4.8 | 1,958.7 | 7.3 |
| Agosto-Octubre | 1,864.2 | 1,835.3 | 1.5 | 1,806.9 | 3.1 |
| Total | 3,977.7 | 3,847.1 | 3.3 | 3,765.7 | 5.3 |

El ahorro de carga térmica generado por el EAHE se ve reflejado en una disminución en la producción de enfriamiento y en el consumo de calor auxiliar para activar el enfriador por absorción en condiciones de máxima demanda.

Los ahorros de calor auxiliar generados por la operación del EAHE se resumen en la Tabla; 11 por periodo cálido, y por ahorro anual total. Operar el EAHE en su modo de operación continuo (24 h) durante el primer periodo cálido, reduce el consumo de 337.2 kWh de calor auxiliar, que representan el 8.21% del consumo total anual. Mientras que durante el segundo periodo cálido reduce 57.3 kWh de calor auxiliar, que representan el 11.71 % del consumo total anual.

Tabla 11. Ahorro de calor auxiliar generado por el EAHE.

| Ahorros calor auxiliar | Sin EAHE | EAHE complementario (0-7 y 15-24 h) | | EAHE 24 h | |
|-------------------------------|-----------------|--|-------------|------------------|--------------|
| Periodo | Consumo (kWh) | Consumo (kWh) | Ahorro (%) | Consumo (kWh) | Ahorro (%) |
| Mayo-Junio | 591.6 | 365.7 | 38.2 | 254.4 | 56.99 |
| Agosto-Octubre | 3,513.9 | 3,173.3 | 9.7 | 3032.8 | 13.69 |
| Total | 4,105.5 | 3,593 | 13.8 | 3,287.2 | 19.93 |

En general, el EAHE tuvo un mejor desempeño durante el primer periodo cálido, debido a que la carga térmica es menor, lo cual puede corroborarse comparando la temperatura y la demanda térmica del aula entre la semana crítica de cada periodo cálido. A pesar de que durante el segundo periodo cálido solo reduce 1.4 % de la carga térmica, la reducción en el consumo de calor auxiliar es de 11.7 %, mientras que durante el primer periodo fue de 8.21 %. Esto se debe a que durante el primer periodo el consumo de calor auxiliar operando el SAATEP de forma convencional (sin EAHE) es bajo y la reducción de carga térmica no impacta de manera significativa.

MODO CALEFACCIÓN

Debido a la inercia térmica que presenta la temperatura del subsuelo con respecto a la temperatura ambiente, el EAHE puede funcionar durante la temporada de invierno como sistema de calefacción en las aulas de la escuela Puertecitos. Las Figuras 51 y 52 muestran; el comportamiento sin EAHE, con EAHE operando en el horario de clases (7-15 h) de lunes a viernes y con EAHE operando 24 h de lunes a viernes durante los meses de enero y diciembre. Las barras sombreadas señalan el horario de clase.

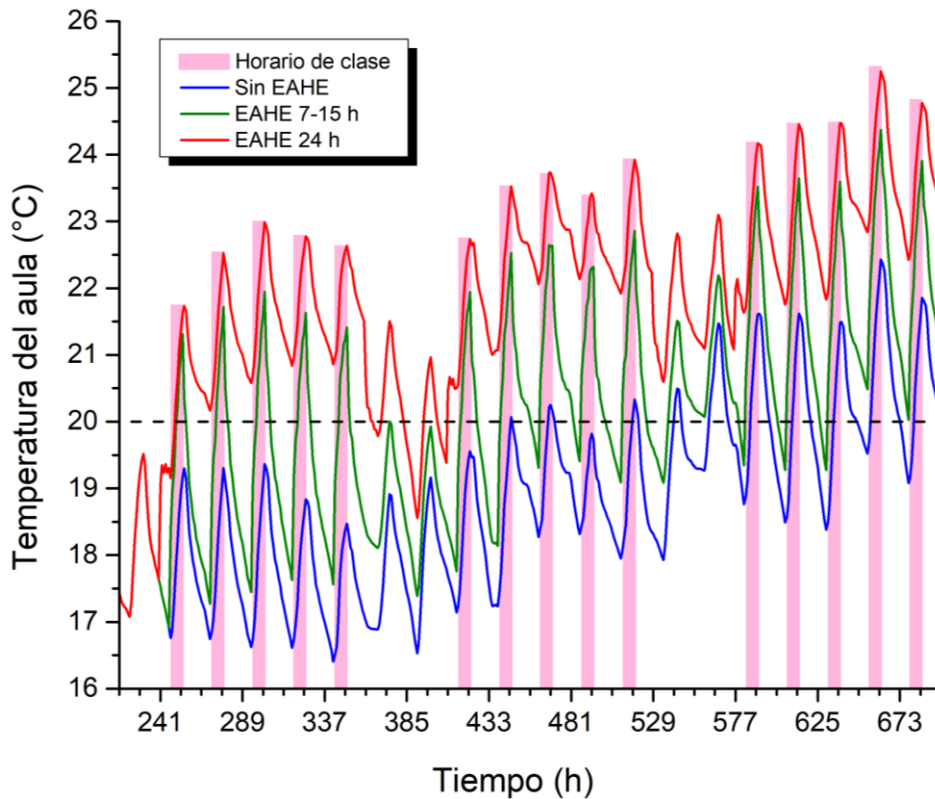


Figura 48. Comportamiento térmico del aula durante el mes de enero.

En el mes de enero, el EAHE tiene un mejor desempeño durante la primera semana de clase (241-360 h). En caso de operar 24 h logra adicionar 140.4 kWh de calefacción que representan 41.28 % del total de adición de calor mensual. Esto se debe a que durante esta semana la temperatura del aula es menor, y la temperatura del subsuelo es mayor en comparación con las siguientes semanas, además.

Basado en un punto de temperatura deseada para calefacción de 20 °C, el aula alcanza condiciones de confort después de 3 h de funcionamiento del EAHE en su modo

de operación continuo (24 h) y se mantiene por encima de 20 °C toda la semana completa.

En caso de operar el EAHE durante el horario de clases (7-15 h) la temperatura del aula supera los 20 °C hasta las 11 h aproximadamente y logra mantenerlo hasta la hora de salida. Sin embargo, apagarlo a la hora de salida (15 h) hace que la temperatura del aula caiga nuevamente por debajo de 20 °C a pesar de las ganancias por radiación solar que ocurren entre 15 y 17 h.

En promedio, operar el EAHE 24 h de lunes a viernes incrementa la temperatura del aula 3.4 °C y operar el EAHE durante el horario de clases (7-15 h) incrementa la temperatura del aula 2.5 °C.

La Figura 52 muestra el desempeño del EAHE en el mes de diciembre, el EAHE tiene un mejor desempeño durante la tercera semana de clase (8353-8472 h). En caso de operarlo durante 24 h, adiciona 112 kWh de calefacción al aula que representan 41.17 % del total de adición de calor mensual. Al operarlo en el horario de clase 7-15 h, adiciona 49.4 kWh de calefacción al aula que representan 18.14 % del total mensual.

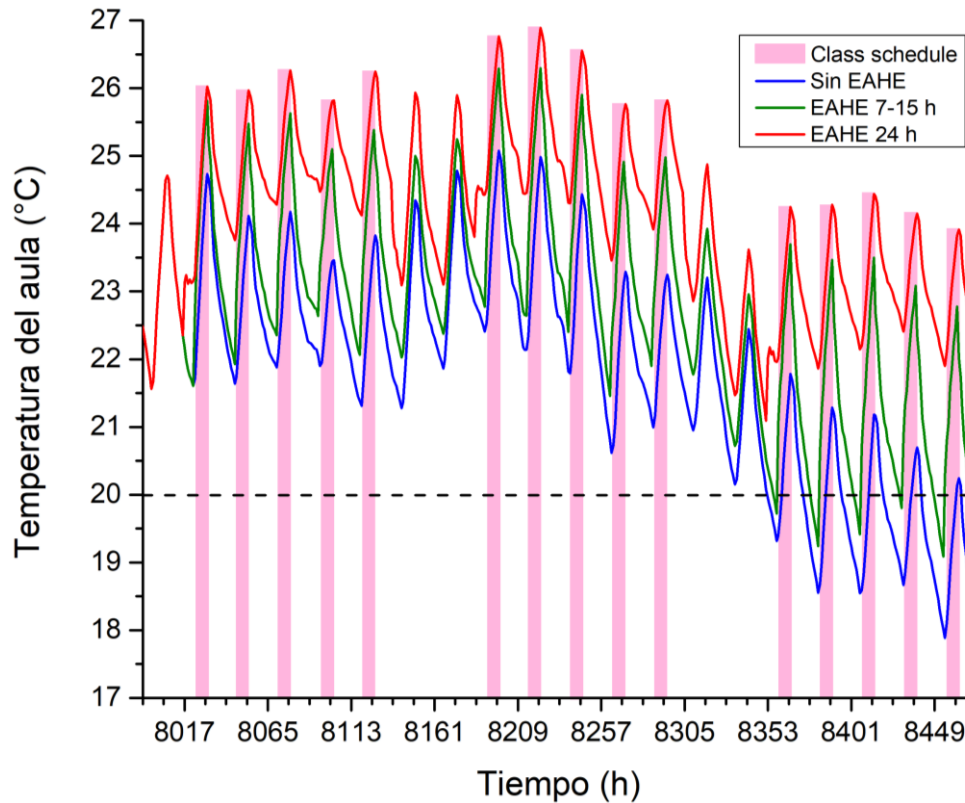


Figura 49. Comportamiento térmico del aula durante el mes de diciembre.

Basado en un punto de temperatura deseada para calefacción de 20 °C, el aula alcanza condiciones de confort aun sin operar el EAHE durante las primeras dos semanas de clase. En caso de operar el EAHE 24 h se eleva la temperatura en un rango de 2.14 °C durante la primera semana y 2.34 °C durante la segunda semana, por lo que se considera no necesario su utilización en modo calefacción.

La tercera semana la temperatura a las 7 h es menor a 20 °C y alcanza condiciones de confort hasta las 10 h en caso de no usar EAHE, en caso de usar el EAHE por 24 h se mantiene por encima de 20 °C toda la semana completa. En caso de operar el EAHE durante el horario de clases (7-15 h) la temperatura del aula supera los 20 °C desde el inicio de clases y logra mantenerlo hasta la hora de salida. Por este motivo, se seleccionó el horario de operación 7-15 h como el óptimo para el mes de diciembre.

En el mes de diciembre (Figura 16), el potencial de calefacción del EAHE es menor en comparación con el mes de enero. Operar el EAHE de domingo a viernes en un horario de 7 a 15 h y 24 h genera una adición mensual de calor al aula de 117.5 y 300.6 kWh respectivamente. En el mes de enero operar el EAHE de domingo a viernes en un horario

de 7 a 15 h y 24 h genera una adición mensual de calor al aula de 149.6 y 391.2 kWh respectivamente. El resumen de adición de calor al aula se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Adición de calor al aula por parte del EAHE en modo calefacción.

| <u>Adición de calor EAHE</u> | EAHE 7-15 h | EAHE 24 h | Incremento |
|---|--------------------|-------------------|-------------------|
| Periodo | Calefacción (kWh) | Calefacción (kWh) | (%) |
| Enero | 149.6 | 391.2 | 161 % |
| Diciembre | 117.5 | 300.6 | 155 % |
| Total | 267.1 | 491.8 | 84.12 % |

4.5.4 Estudio operativo de intercambiador de calor tierra-agua

La Figura 52 muestra el desempeño del EWHE durante la semana crítica del primer periodo cálido (4441-4560 h). En promedio la operación del EWHE reduce $0.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ la temperatura del agua de enfriamiento a la entrada de la torre, con respecto a la operación convencional del SAATEP. Esto se ve reflejado en una disminución de 489 litros de agua evaporada en la torre de enfriamiento, que equivalen al 14.84% del consumo total de agua durante esta semana.

El EWHE tuvo un mejor desempeño durante los días miércoles y jueves de la semana crítica, reduciendo en promedio 14.3 y 15 kg/h de agua respectivamente, mientras que el resto de los días el promedio fue de 11.54 kg/h. Esto se debe a que el agua a la salida del EWHE tiene una menor temperatura en comparación con los otros días y con ello retrasa por una hora la operación de la torre de enfriamiento.

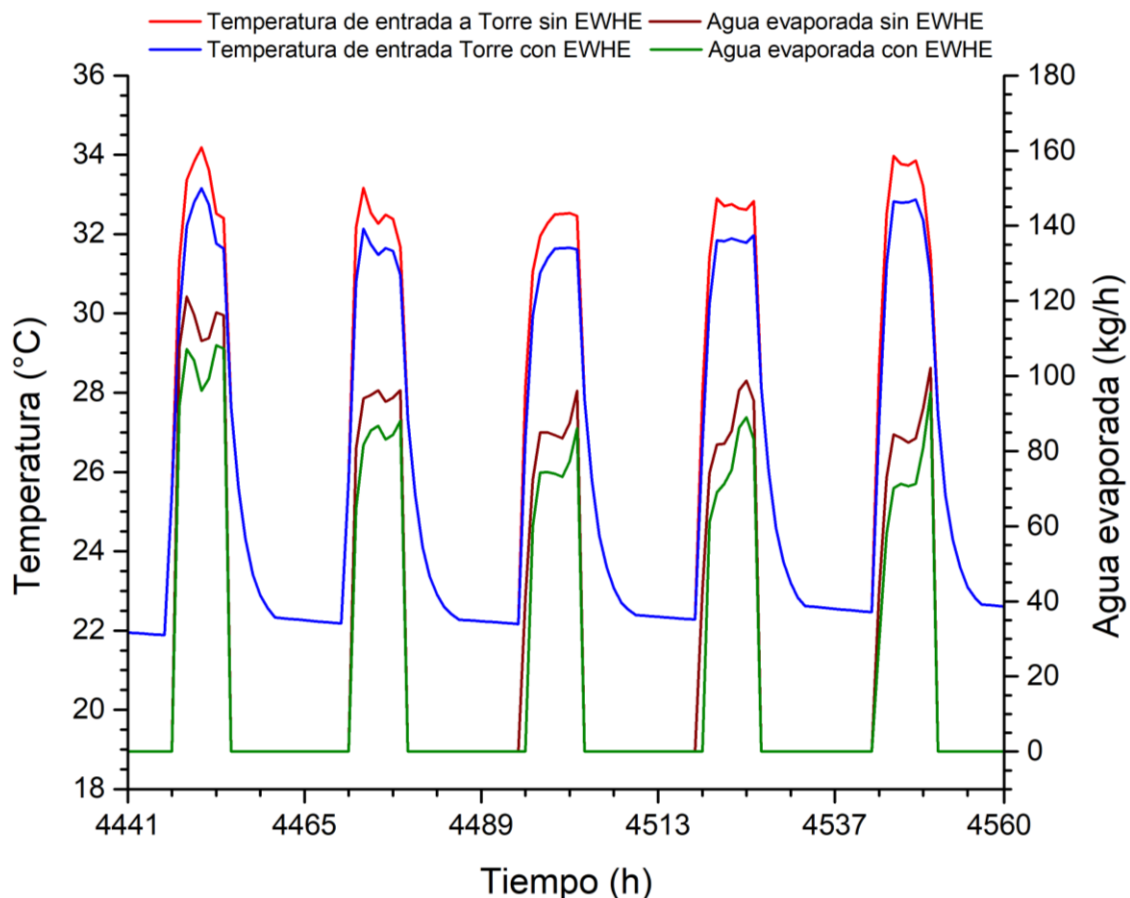


Figura 50. Comportamiento del subsistema de agua de enfriamiento durante la semana crítica del primer periodo cálido.

Utilizar el EWHE durante todo el primer periodo cálido (2905-4560 h), evita el consumo de 4799 litros de agua que representan el 29.9% del consumo total de agua durante este periodo.

La Figura 53 muestra el desempeño del EWHE durante la semana crítica del segundo periodo cálido (5665-7153 h). En promedio, la temperatura del agua de enfriamiento a la entrada de la torre es 1.3 °C menor en caso de usar el EWHE, esto se ve reflejado en una disminución de 788 litros de agua que equivalen al 17.9% del consumo total de agua durante esta semana.

El EWHE tuvo un mejor desempeño durante el día miércoles, reduciendo en promedio 23.9 kg/h de agua, a pesar de que los días lunes y viernes el EWHE logró retrasar por una hora la operación de la torre de enfriamiento, sus promedios diarios fueron de 22.3 y 21.5 kg/h, respectivamente.

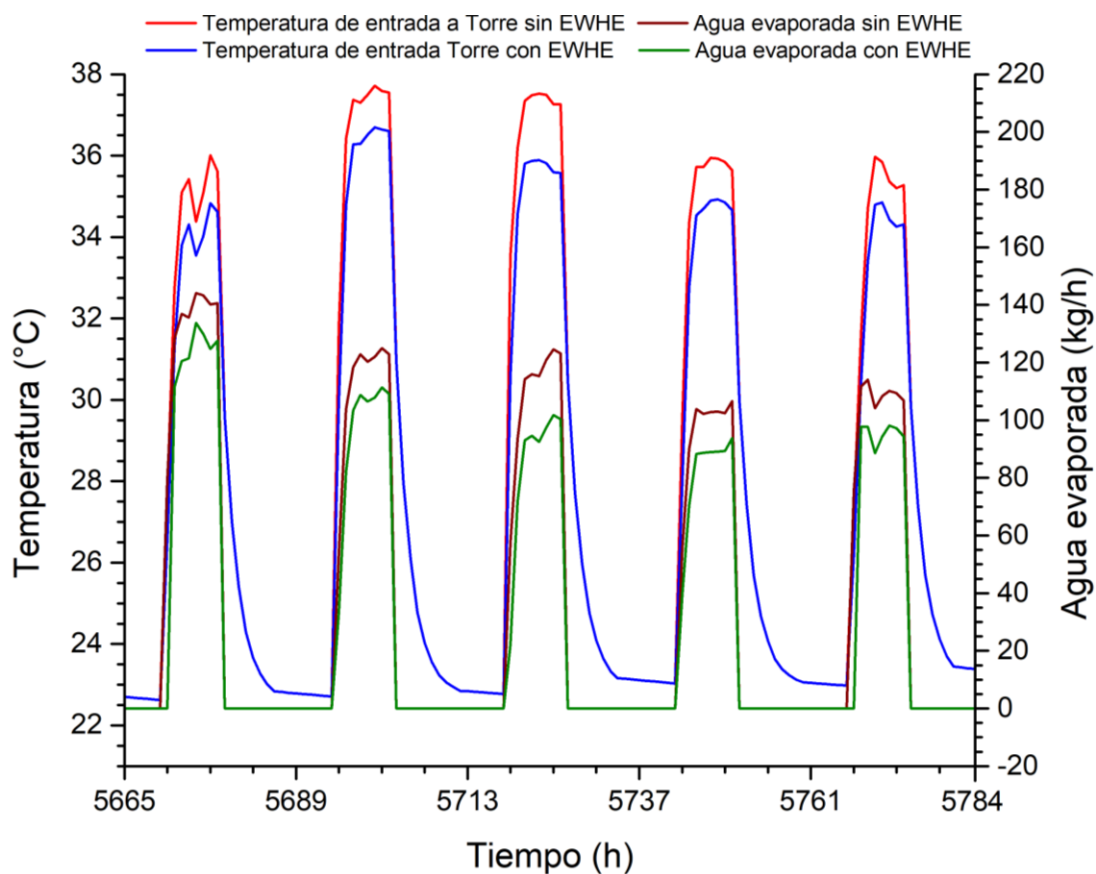


Figura 51. Comportamiento del subsistema de agua de enfriamiento en la semana crítica del segundo periodo cálido.

Utilizar el EWHE durante todo el segundo periodo cálido (5665-7153 h), evita el consumo de 3295 litros de agua que representan el 18% del consumo total de agua durante este periodo.

Los ahorros de agua evaporada generados por la operación del EWHE se resumen en la Tabla; 13 por periodo cálido, y por ahorro anual total. Es posible determinar que el EWHE tiene un mejor desempeño durante el primer periodo cálido, donde reduce el consumo de 4799 kg de agua, que representan el 14.1% del consumo total anual. Mientras que durante el segundo periodo cálido reduce 3295 kg de agua, que representan el 9.7% del consumo total anual.

Tabla 13. Ahorro de agua evaporada generado por el EWHE.

| <u>Ahorros agua evaporada</u> | Sin EWHE | Con EWHE | |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| Periodo | Consumo (kg/h) | Consumo (kg/h) | Ahorro (%) |
| Mayo-Junio | <i>16,026.2</i> | <i>11,227.1</i> | 29.94 |
| Agosto-October | <i>17,939.3</i> | <i>14,644.1</i> | 18.37 |
| Total | 33,965.5 | 25,871.2 | 23.83 |

La diferencia en el desempeño por temporada se debe a que durante el primer periodo cálido la temperatura ambiente, de la edificación y la carga térmica son menores con respecto al segundo periodo cálido. Esto provoca que el EWHE disipe una menor cantidad de calor al subsuelo, evitando y/o disminuyendo su incremento de temperatura por acumulación de calor. Además, la temperatura del subsuelo a 4 m de profundidad presenta valores menores durante el primer periodo cálido, en promedio su temperatura es de 26.5 °C, mientras que en el segundo periodo cálido es de 29.2 °C.

4.6 Conclusiones

El presente trabajo evaluó técnicamente la integración de intercambiadores de calor geotérmicos al subsistema de enfriamiento y al subsistema de agua fría de un sistema de enfriamiento por absorción, por medio de una simulación que utiliza datos experimentales de edificación, meteorología y subsuelo obtenidos en sitio. Los resultados indican que:

El mes de agosto es crítico para la operación convencional del SAATEP, debido a que la temperatura ambiente y la humedad relativa presentan sus mayores promedios con 33 °C y 62%, respectivamente, limitando la capacidad de rechazo de calor en la torre de enfriamiento justo cuando la carga térmica de la edificación presenta sus máximos valores (13.5 kW). A su vez, el promedio de radiación solar (477 W/m²) es 12.2% menor con respecto a la máxima (543 W/m²), por lo cual el calor útil para la activación del enfriador por absorción es menor en comparación con la temporada mayo-junio, aumentando el consumo de calor auxiliar. Concluyendo que la operación de intercambiadores de calor geotérmicos tiene mayor importancia durante este mes.

La medición experimental de temperatura en el subsuelo resultó fundamental para identificar que el modelo matemático utilizado para la obtención teórica del perfil de temperatura en el subsuelo no resultó cercano a la realidad. La T_m ambiente presentó un valor de 24.73 °C, en teoría la temperatura del subsuelo debería oscilar este valor con menor amplitud hasta alcanzar la profundidad sin perturbaciones y presentarlo de manera constante, sin embargo, la T_m incrementa 3.05, 3.23, 3.37 y 3.48 °C a 1, 2, 3 y 4 m de profundidad, respectivamente. Este incremento de temperatura puede atribuirse a la presencia de manifestación hidrotermal a menos de 1.2 km de distancia.

Ambos sistemas geotérmicos tuvieron mejor desempeño durante el primer periodo cálido, el EAHE logró reducir 7.3 % de carga térmica y el 57% de calor auxiliar, mientras que en el segundo periodo cálido solo redujo el 3.1 y 13.7% respectivamente. Por su parte el EWHE logró reducir el 29.9 % del consumo de agua, mientras que en el segundo periodo redujo únicamente 18.37%. Esto se debe a que la temperatura del subsuelo

durante el primer periodo cálido (27.11 °C) es 1.83 °C menor comparada con el segundo periodo cálido (28.94 °C).

A pesar de que el ahorro de carga térmica anual generado por el EAHE es de 5.3 %, logra reducir el 19.9% del consumo de calor auxiliar anual. También se descubrió que operarlo simultáneamente con el sistema de enfriamiento por absorción permite alcanzar condiciones de confort (25 °C) durante los días en que la demanda térmica del aula es mayor en comparación con la capacidad nominal del enfriador por absorción, operando como sistema auxiliar de A/C.

La operación del EAHE en modo calefacción tuvo mejor desempeño en enero, manteniendo la temperatura del aula por encima de 20 °C durante todo el mes, en promedio, incrementa la temperatura del aula en 3.4 °C durante el horario de clases, mientras que en el mes de diciembre la incrementa 2.6 °C. Esto se debe a que la temperatura promedio del aula en enero es 3.1 °C menor comparada con el mes de diciembre. Aunque la temperatura del subsuelo a 4 m también disminuye y es 0.75 °C menor comparada con diciembre, el diferencial de temperatura entre aula y subsuelo es mayor, $\Delta T_{aula-suelo,enero}=9.9$ °C y $\Delta T_{aula-suelo,diciembre}=7.5$ °C, lo cual se ve reflejado en un mayor potencial de calefacción.

La integración del EWHE al SAATEP fue la que tuvo un mejor desempeño dado que logra reducir (23.83%) aproximadamente una cuarta parte del consumo anual de agua en la torre de enfriamiento. Sumado a que algunos días logra retrasar la operación de la torre de enfriamiento durante la primera hora de clase, evitando la operación de la bomba de agua de enfriamiento y el ventilador de la torre.

REFERENCIAS:

- Acuña, A., Lara, F., Rosales, P., Suastegui, J., Velázquez, N., & Ruelas, A. (2017). Impact of a vertical geothermal heat exchanger on the solar fraction of a solar cooling system. *International Journal of Refrigeration*, 76, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.02.007>
- Agrawal, K. K., Misra, R., & Agrawal, G. Das. (2020). Improving the thermal performance of ground air heat exchanger system using sand-bentonite (in dry and wet condition) as backfilling material. *Renewable Energy*, 146, 2008–2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.044>
- Agrawal, K. K., Misra, R., Agrawal, G. Das, Bhardwaj, M., & Jamuwa, D. K. (2019). The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system. *Geothermics*, 82(May), 34–50. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.05.011>
- Aguilar-jiménez, J. A., Velázquez, N., Acuña, A., Cota, R., González, E., González, L., López, R., & Islas, S. (2018). Techno-economic analysis of a hybrid PV-CSP system with thermal energy storage applied to isolated microgrids. *Solar Energy*, 174, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.078>
- Aguilar-Jiménez, J.A., Velázquez-Limón, N., López-Zavala, R., González-Uribe, L. A., Islas, S., Gonzáles, E., Ramírez, L., & Beltrán, R. (2020). Optimum operational strategies for a solar absorption cooling system in an isolated school of Mexico. *International Journal of Refrigeration*, 112, 1–13. <https://doi.org/doi.or/10.1016/j.ijrefrig.2019.12.010>
- Aguilar-Jiménez, Jesus Armando, Velázquez, N., López-Zavala, R., González-Uribe, L. A., Beltrán, R., & Hernández-Callejo, L. (2019). Simulation of a Solar-Assisted Air-Conditioning System Applied to a Remote School. *Applied Sciences*, 9, 3398. <https://doi.org/10.3390/app9163398>
- Al-Ajmi, F., Loveday, D. L., & Hanby, V. I. (2006). The cooling potential of earth–air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate. *Building and Environment*, 41, 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.027>
- Al-Atrash, F., Hellwig, R. T., & Wagner, A. (2020). The degree of adaptive thermal comfort in office workers in a hot-summer Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110147>
- Aresti, L., Christodoulides, P., & Florides, G. (2018). A review of the design aspects of ground heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92(March), 757–773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.053>
- Arkhangelskaya, T., & Lukyashchenko, K. (2017). Estimating soil thermal diffusivity at different water contents from easily available data on soil texture , bulk density , and organic carbon content. *Biosystems Engineering*, 168(Numerical tools for soils), 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.011>
- Asgari, B., Habibi, M., & Hakkaki-Fard, A. (2020). Assessment and comparison of different arrangements of horizontal ground heat exchangers for high energy required applications. *Applied Thermal Engineering*, 167(December 2019), 114770. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114770>

- ASTM International. (2017). ASTM D7928-17 Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis. *Annual Book of ASTM Standards 2017, May 2016*, 1–25. <https://doi.org/10.1520/D7928-16E01>
- Baglivo, C., D'agostino, D., & Congedo, P. M. (2018). Design of a Ventilation System Coupled with a Horizontal Air-Ground Heat Exchanger (HAGHE) for a Residential Building in a Warm Climate. *Energies*, *11*. <https://doi.org/10.3390/en11082122>
- Bahadori, M. N. (1978). Passive Cooling Systems in Iranian Architecture. *SCIENTIFIC AMERICAN, INC*, 144–155. <https://doi.org/10.4324/9781315793245-10>
- Bansal, V., Mishra, R., Agarwal, G. Das, & Mathur, J. (2012). Performance analysis of integrated earth-air-tunnel-evaporative cooling system in hot and dry climate. *Energy and Buildings*, *47*, 525–532. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.024>
- Bansal, V., Misra, R., Das, G., & Mathur, J. (2010). Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for summer cooling. *Energy and Buildings*, *42*, 645–648. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.001>
- Bouyoucos, G. J. (1962). *Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils*. 3–4.
- CONAGUA. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Matomí-Puertecitos (0238), estado de Baja California*.
- CONAPO. (2010). Índice De Marginación Por Localidad. In *Secretaría de Gobernación*. http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice_de_Marginacion_por_Localidad_2010
- Congedo, P. M., Baglivo, C., Bonuso, S., & D'Agostino, D. (2020). Numerical and experimental analysis of the energy performance of an air-source heat pump (ASHP) coupled with a horizontal earth-to-air heat exchanger (EAHX) in different climates. *Geothermics*, *87*(January 2019), 101845. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101845>
- De Swardt, C. A., & Meyer, J. P. (2001). A performance comparison between an air-source and a ground-source reversible heat pump. *International Journal of Energy Research*, *25*(10), 899–910. <https://doi.org/10.1002/er.730>
- EFICIENCIA ENERGETICA EN EDIFICACIONES.- ENVOLVENTE DE EDIFICIOS PARA USO HABITACIONAL, Pub. L. No. NOM-020-ENER-2011, 45 (2011).
- Du, R., Jiang, D. D., Wang, Y., & Wei Shah, K. (2020). An experimental investigation of CuO/water nanofluid heat transfer in geothermal heat exchanger. *Energy and Buildings*, *227*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110402>
- Eicker, U., Pietruschka, D., & Pesch, R. (2012). Heat rejection and primary energy efficiency of solar driven absorption cooling systems. *International Journal of Refrigeration*, *35*(3), 729–738. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.01.012>
- Fishburn, J. J. (1947). Ben Hershey --- Lumber Baron. *The Palimpsest*, *28*(10), 289–299.
- Gao, J., Li, A., Xu, X., Gang, W., & Yan, T. (2018). Ground heat exchangers: Applications, technology integration and potentials for zero energy buildings. *Renewable Energy*, *128*, 337–349. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.089>
- García, E. (2004). Modificaciones al Sistema Climático Köppen. In *Instituto de Geografía* (p. 98). http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf

- Goel, R. K., Singh, B., & Zhao, J. (2012). *Underground Infrastructures: Planning, Design, and Construction*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-397168-5.00001-8>
- Goswami, D. S., & Ileslamlou, S. (1990). Performance analysis of a closed-loop climate control system using underground air tunnel. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 112(2), 76–81. <https://doi.org/10.1115/1.2929650>
- Gutiérrez-Negrín, L. C. A., Canchola Félix, I., Romo-Jones, J. M., & Quijano-León, J. L. (2020). Geothermal energy in Mexico: update and perspectives. *Proceedings World Geothermal Congress 2020*.
- Hasan, M. I., & Noori, S. W. (2019). A study of the potential of using the Earth to air heat exchanger for cooling and heating of residential buildings in Iraq. *Heat Transfer - Asian Research*, 48(8), 3902–3927. <https://doi.org/10.1002/htj.21574>
- Hillel, D. (1982). *Intoduction to Soil Physics*. Academic Press 1982. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2009-0-03052-9>
- Horvath, C., Hwang, Y., Radermacher, R., Gerstler, W., & Tang, C.-J. (2014). Waste heat and electrically driven hybrid cooling systems for a high ambient temperature, off-grid application. *Energy*, 66, 711–721. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.058>
- IEA. (2018). The Future of Cooling. In *Opportunities for energy-efficient air conditioning*. <https://doi.org/10.1787/9789264301993-en>
- Javadi, H., Mousavi Ajarostaghi, S. S., Rosen, M. A., & Pourfallah, M. (2019). Performance of ground heat exchangers: A comprehensive review of recent advances. *Energy*, 178, 207–233. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.094>
- Kapıcioğlu, A., & Esen, H. (2020). Experimental investigation on using Al₂O₃/ethylene glycol-water nano-fluid in different types of horizontal ground heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 165(April 2019). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114559>
- Khalajzadeh, V., Farmahini-Farahani, M., & Heidarinejad, G. (2012). A novel integrated system of ground heat exchanger and indirect evaporative cooler. *Energy and Buildings*, 49, 604–610. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.009>
- Krarti, M., Claridge, D. E., & Kreider, J. F. (1995). Analytical model to predict nonhomogeneous soil temperature variation. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 117(2), 100–107. <https://doi.org/10.1115/1.2870823>
- Lee, K., Kang, E., Kim, Y., & Lee, E. (2019). Model Verification and Justification Study of Spirally Corrugated Pipes in a Ground-Air Heat Exchanger Application. *Energies*, 12, 71–83. <https://doi.org/10.3390/en12214047>
- Lee, K. S., Kang, E. C., Kim, Y. J., & Lee, E. J. (2019). Model verification and justification study of spirally corrugated pipes in a ground-air heat exchanger application. *Energies*, 12(21). <https://doi.org/10.3390/en12214047>
- Li, H., Ni, L., Yao, Y., & Sun, C. (2019). Experimental investigation on the cooling performance of an Earth to Air Heat Exchanger (EAHE) equipped with an irrigation system to adjust soil moisture. *Energy and Buildings*, 196, 280–292. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.007>
- Llopis, G., & Rodrigo, V. (2008). Guía de la Energía Geotérmica. *Universidad Politécnica de Madrid*, 178. <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-de-la-energia-geotermica.pdf>
- Lund, J. W., & Toth, A. N. (2021). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide

- review. *Geothermics*, 90(July 2020).
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915>
- Marc, O., Lucas, F., Sinama, F., & Monceyron, E. (2010a). Experimental investigation of a solar cooling absorption system operating without any backup system under tropical climate. *Energy and Buildings*, 42(6), 774–782.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.006>
- Marc, O., Lucas, F., Sinama, F., & Monceyron, E. (2010b). Experimental investigation of a solar cooling absorption system operating without any backup system under tropical climate. *Energy and Buildings*, 42, 774–782.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.006>
- METEONORM. (2014). Handbook part I: Software Global Meteorological Database Version 7 Software and Data for Engineers, Planers and Education The Meteorological Reference for Solar Energy Applications, Building Design, Heating & Cooling Systems, Education Renewable Energy. *Handbook Part I: Software, March*.
https://meteonorm.com/assets/downloads/mn73_software.pdf
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., Lewis, J. O., & Asimakopoulos, D. N. (1997). On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. *Solar Energy*, 60(3–4), 181–190. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00012-1)
- Ozgener, O., Ozgener, L., & Tester, J. W. (2013). A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62, 473–480.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.031>
- Pahud, D., & Hellström, G. (1996). Duct Ground Heat Storage Model for Trnsys (Trnvdst). *Proc. Eurotherm Seminar 49*, 127–36.
- Permchart, W., & Tanatvanit, S. (2009). Study on using the ground as a heat sink for a 12,000-Btu/h modified air conditioner. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 39(3), 15–18.
- Pokharel, T. R., Rijal, H. B., & Shukuya, M. (2020). A field investigation on indoor thermal environment and its associated energy use in three climatic regions in Nepal. *Energy and Buildings*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110073>
- Reynolds, S. G. (1970a). The gravimetric method of soil moisture determination part I: A study of equipment, and methodological problems. *Journal of Hidrology*, 11, 258–273.
- Reynolds, S. G. (1970b). The gravimetric method of soil moisture determination part II: Typical required sample sizes and methods of reducing variability. *Journal of Hydrology*, 11, 274–287.
- Reynolds, S. G. (1970c). The gravimetric method of soil moisture determination part III: An examination of factors influencing soil moisture variability. *Journal of Hidrology*, 11, 288–300.
- Ríos Arriola, J. (2019). *Análisis de factibilidad para climatización de edificaciones con energía geotérmica de baja entalpía en el ejido “Bonfil” Santa Rosalía B.C.S.* Universidad Autónoma de Baja California.
- Said, S. A. M., Habib, M. A., Mokheimer, E. M. A., & El-Sharqawi, M. H. (2010). Feasibility of using ground-coupled condensers in A/C systems. *Geothermics*, 39(2), 201–204.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.02.001>
- Sakhri, N., Menni, Y., & Ameer, H. (2020). Effect of the pipe material and burying depth

- on the thermal efficiency of earth-to-air heat exchangers. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2(May), 100013. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100013>
- Sena Lozoya, E. B. (2019). *Exploración sísmica y térmica somera y su correlación con columnas litológicas de pozos en la caldera La Reforma, Baja California Sur, México*. 131. <https://colecciondigital.cemiegoe.org/xmlui/handle/123456789/4664?show=full>
- Serageldin, A. A., Abdelrahman, A. K., & Ookawara, S. (2016). Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation. *Energy Conversion and Management*, 122, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.053>
- Shirazi, A., Taylor, R. A., Morrison, G. L., & White, S. D. (2018). Solar-powered absorption chillers: A comprehensive and critical review. *Energy Conversion and Management*, 171(January), 59–81. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.091>
- Singh, A., & Singh, R. (2015). Performance Analysis of Earth-Air Tunnel System used for Air- Conditioning of the College Classroom. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 5(8), 71–79.
- Singh, R. K., & Sharma, R. V. (2017). Numerical analysis for ground temperature variation. *Geothermal Energy*, 5–22. <https://doi.org/10.1186/s40517-017-0082-z>
- Sodha, M. S., Sharma, A. K., Singh, S. P., Bansal, N. K., & Kumar, A. (1985). Evaluation of an Earth-Air Tunnel System for Cooling/Heating of a Hospital Complex. *Building and Environment*, 20(2), 115–122.
- Solar Energy Laboratory. (2013). *Mathematical Reference Trnsys 17. 5*, 1–79.
- Soni, S. K., Pandey, M., & Bartaria, V. N. (2016). Experimental analysis of a direct expansion ground coupled heat exchange system for space cooling requirements. *Energy and Buildings*, 119, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.026>
- Stenzel, F., Greve, P., Lucht, W., Tramberend, S., Wada, Y., & Gerten, D. (2021). Irrigation of biomass plantations may globally increase water stress more than climate change. *Nature Communications*, 12(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21640-3>
- Stylianou, I. I., Tassou, S., Christodoulides, P., Aresti, L., & Florides, G. (2019). Modeling of vertical ground heat exchangers in the presence of groundwater flow and underground temperature gradient. *Energy and Buildings*, 192, 15–30. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.020>
- Vereda Ortiz, C. S. (2015). *Eyector-absorbedor adiabático como potenciador de un ciclo híbrido para refrigeración por absorción basado en la disolución amoniaco-nitrato de litio*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Vidhi, R. (2014). *Organic Fluids and Passive Cooling in a Supercritical Rankine Cycle for Power Generation from Low Grade Heat Sources*.
- Zogg, M. (2008). History of Heat Pumps. Swiss Contributions and International Milestones. *9th International IEA Heat Pump Conference, 20 – 22 May 2008, Zürich, Switzerland, May, 20–22*. z:%5CProjets%5Cnen%5Cncours%5CDocumentation%5CBiblioth?que%5Cnum?rique%5CZogg_2008.pdf

Anexo 1: Fichas técnicas



HOBO[®] TMCx-HD Sensor

Air/Water/Soil Temperature

The TMC temperature probe, for use in air, soil, or water, works with the HOBO UX120-006M, MX1100, ZW series, or U-Series data loggers.



Key Advantages:

- Accuracy and resolution vary according to attached logger model
- Measurement range is -40° to 100°C (-40° to 212°F)
- **Response time in air:** 2 min. typical to 90% in air moving 1 m/sec (2.2 mph)
- **Response time in stirred water:** 30 sec. typical to 90%
- Sensor is attached to a 0.3 m (1 ft), 1.8 m (6 ft), 6.1 m (20 ft), or 15.2 m (50 ft) cable

Measurement range: -40° to 50°C (-40° to 122°F) in water; -40° to 100°C (-40° to 212°F) in air

Accuracy:

w/U12: ±0.25°C from 0° to 50°C (±0.45°F from 32° to 122°F), insert probe 2.3 cm (0.9 inches) minimum;

w/ZW: ±0.21°C from 0° to 50°C (±0.38°F from 32° to 122°F), insert probe 2.3 cm (0.9 inches) minimum;

w/UX120-006M, MX1104, and MX1105: ±0.15°C from 0° to 70°C (±0.27°F from 32° to 158°F), insert probe 2.3 cm (0.9 inches) minimum;

Resolution:

w/U12: 0.03° at 20°C (0.05° at 68°F);

w/ZW: 0.02°C at 25°C (0.04°F at 77°F);

w/UX120-006M, MX1104, and MX1105: 0.002° at 25°C (0.003° at 77°F);

Drift: <0.1°C (<0.2°F) per year

Response time in air: 2 min. typical to 90% in air moving 1 m/sec (2.2 mph)

Response time in stirred water: 30 sec. typical to 90%.

Operating range: Sensor tip and cable immersion in fresh water up to +50°C (122°F) for 1 year

Housing: Copper-plated sensor tip

Dimensions: 5.1 x 33 mm (0.2 x 1.3 inches)

Weight: 34 g (1.1 oz)

Contact Us

Sales (8am to 5pm ET, Monday through Friday)

▶ Email sales@onsetcomp.com

▶ Call 1-508-759-9500

▶ In U.S. toll free 1-800-564-4377

▶ Fax 1-508-759-9100

Technical Support (8am to 6pm ET, Monday through Friday)

▶ Contact Product Support www.onsetcomp.com/support/contact

▶ Call 1-508-759-9500

▶ In U.S. toll free 1-877-564-4377



HOBO® UX120 4-Channel Analog Logger

Flexible, Accurate, 4-channel Analog Logger

The HOBO UX120-006M Analog Logger is a high-performance, LCD display data logger for building performance monitoring applications.

Supported Measurements: Temperature, 4-20mA, AC Current, AC Voltage, Air Velocity, Carbon Dioxide, Compressed Air Flow, DC Current, DC Voltage, Gauge Pressure, Kilowatts, Volatile Organic Compound

Key Advantages:

- Twice the accuracy over previous models
- 16-bit resolution
- Flexible support for a wide range of external sensors
- LCD confirms logger operation and displays near real-time measurement data
- Provides minimum, maximum, average, and standard deviation logging options
- On-screen alarms notify you when a sensor reading exceeds set thresholds
- Stores 1.9 million measurements for longer deployments between offloads



► For complete information and accessories, please visit: www.onsetcomp.com

| Part number | UX120-006M |
|-----------------|--|
| Memory | 1.9 Million |
| Logging Rate | 1 second to 18 hours, user selectable |
| Logging Modes | Normal, Burst, Statistics |
| Memory Modes | Wrap when full or stop when full |
| Time Accuracy | ±1 minute per month at 25°C (77°F) |
| Battery Life | 1 year typical with logging rate of 1 minute and sampling interval of 15 seconds or greater, user replaceable, 2 AAA |
| Dimensions | 10.8 x 5.41 x 2.54 cm (4.25 x 2.13 x 1 in.) |
| Operating Range | Logging: -20° to 70°C (-4° to 158°F); 0 to 95% RH (non-condensing) |
| Accuracy | ±0.1 mV ±0.1% of reading |
| CE Compliant | Yes |

*USB cable included with software part # BHW-PRO-CD

Contact Us

Sales (8am to 5pm ET, Monday through Friday)

- Email sales@onsetcomp.com
- Call 1-508-759-9500
- In U.S. toll free 1-800-564-4377
- Fax 1-508-759-9100

Technical Support (8am to 8pm ET, Monday through Friday)

- Contact Product Support onsetcomp.com/support/contact
- Call 1-508-759-9500
- In U.S. toll free 1-877-564-4377

Onset Computer Corporation
470 MacArthur Boulevard
Bourne, MA 02532

Minimum System Requirements:



Software USB cable*