

## **Dimensionamiento e instalación de intercambiador de calor geotérmico horizontal para bombas de calor en Morelia, México**

**Daniel Alcántar Martínez, Oskar Javier González Pedraza, Crisanto Mendoza Covarrubias, J. Jesús Pacheco Ibarra y H. Cuauhtémoc Gutiérrez Sánchez**

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Grupo de Eficiencia Energética y Energías Renovables (GREEN-ER), Morelia, México. Correos: [danielcan\\_mtz@hotmail.com](mailto:danielcan_mtz@hotmail.com), [oniblueoskar@gmail.com](mailto:oniblueoskar@gmail.com), [crisantom@yahoo.com.mx](mailto:crisantom@yahoo.com.mx), [jpacheco@umich.mx](mailto:jpacheco@umich.mx), [hcgshan@umich.mx](mailto:hcgshan@umich.mx)

### **RESUMEN**

Se presenta un trabajo referente al uso directo de la energía geotérmica, para el caso de un sistema de clima controlado mediante bombas de calor geotérmico con intercambiadores de calor horizontales. El principal componente de este sistema es el intercambiador de calor geotérmico, dispositivo encargado de realizar el proceso de transferencia de calor con el subsuelo, por medio de la inercia térmica de la corteza terrestre. Se presenta la metodología para determinar la longitud necesaria para suministrar energía térmica a una bomba de calor, para el acondicionamiento de un edificio educativo perteneciente a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, Mich. El dimensionamiento se basó en el cumplimiento de una serie de objetivos trazados con el fin de obtener los valores de las variables necesarias para dimensionar un intercambiador de calor geotérmico horizontal, para lo que fue necesario construir un modelo virtual del complejo en Autodesk Revit® 2015. Por medio de esta herramienta se determinaron los valores de las cargas térmicas del sistema, que se obtuvieron para los dos modos de operación de la bomba de calor, modo calefacción y modo refrigeración. Como herramienta empleada para el dimensionamiento se empleó la metodología planteada por IGSHA, con la ayuda del software Ground Loop Design (GLD) 2014. Como resultado, se obtuvo un valor de 4 trincheras, cada una de 25.3 m de longitud, 1.8 m de profundidad y 0.20 m de ancho, con una separación entre ellas de 6.1 m.

*Palabras clave:* Climatización, dimensiones de trincheras, metodología IGSHA, modelo virtual, Autodesk Revit 2015, GLD 2014.

## **Dimensioning and installation of a horizontal heat exchanger for heat pumps in Morelia, Mexico**

### **ABSTRACT**

This paper deals with the direct use of geothermal energy, in this case of an air conditioning system controlled by geothermal heat pumps with horizontal heat exchangers. The main component of this system is the geothermal heat exchanger, which develops the process of heat transfer with the subsoil, through the thermal inertia of the earth's crust. It is presented the methodology for defining the length necessary to supply heat to a heat pump to be installed in an educational building belonging to the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, in Morelia, Mich. The sizing was based on the accomplishment of a series of objectives in order to obtain the values of the necessary variables to dimension a horizontal geothermal heat exchanger, for which it was necessary to construct a virtual model of the facility in Autodesk Revit® 2015. With this software the values of the thermal loads of the system were determined, which were obtained for the two modes of operation of the heat pump, heating and cooling. As a tool used for sizing, it was applied the methodology proposed by IGSHA, with the support of the software Ground Loop Design (GLD) 2014. As result it was obtained a value of 4 trenches, each of 25.3 m long, 1.8 m deep and 0.20 m wide, with a separation between them of 6.1 m.

**Keywords:** Air conditioning, trench dimensions, IGSHA methodology, virtual model, Autodesk Revit 2015, GLD 2014.

## INTRODUCCIÓN

El calentamiento global, el próximo agotamiento de las fuentes de energía de origen fósil (carbón, gas natural, petróleo) y la necesidad de cuidar el medio ambiente, han hecho que el uso de fuentes renovables, y en general limpias, de energía se haya popularizado en los últimos años. Una de esas fuentes renovables es la energía geotérmica, que se emplea no sólo para generar energía eléctrica sino también en diversos usos directos, uno de las cuales es a través de los dispositivos conocidos como bombas de calor geotérmico.

Por otro lado, se sabe que actualmente los edificios representan aproximadamente el 40% del consumo total de energía (Atam y Helsem, 2015; Parlamento Europeo, 2010). Por lo tanto, en ambientes con climas fríos y/o extremos, se ha incrementado notablemente el uso de las bombas de calor geotérmico para la calefacción y refrigeración de casas y edificios. Así, los cinco países con mayor capacidad instalada en bombas de calor geotérmico son China, Estados Unidos, Suecia, Turquía y Alemania, representando en conjunto el 65.8% de la capacidad mundial. En cuanto al consumo de calor con esas mismas bombas de calor geotérmico, Japón desplaza a Alemania del quinto lugar, por lo que el consumo conjunto de China, Estados Unidos, Suecia, Turquía y Japón representa el 63.6% del uso mundial (Lund y Boyd, 2015).

En México el principal uso de la energía geotérmica ha sido en la producción de electricidad. Sus usos directos en el país se han restringido a la balneología para recreación y en algunos casos usos terapéuticos (Gutiérrez-Negrín, et al., 2015). Hasta donde se sabe, no hay a la fecha bombas de calor operando en el país, es muy bajo y subdesarrollado ya que no hay información disponible.

En este trabajo se presenta una investigación que involucra la aplicación de bombas de calor para climatización de espacios, como parte de un proyecto del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo), denominado *Desarrollo de un sistema para la generación de clima controlado a partir del intercambio de calor con el subsuelo y el aprovechamiento de la inercia térmica de la corteza terrestre, con aplicaciones en complejos industriales, comerciales, públicos y domésticos*. Particularmente, se detalla la metodología y procedimientos utilizados para definir las dimensiones y características de las trincheras donde se instalarán los intercambiadores de calor, de tipo horizontal.

## CASO DE ESTUDIO

Partimos del cálculo de las cargas térmicas del complejo a climatizar con bombas de calor, para el cual se utilizó el software Revit® el cual es parte del software de CAD Autodesk®. Revit permite desarrollar el conjunto y sus espacios de manera virtual, para posteriormente realizar el cálculo de las cargas térmicas del complejo. El caso de estudio se refiere a un edificio de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) que consta de dos niveles. En el primer nivel se encuentran los laboratorios de sinecología, micología, plantas vasculares y no vasculares, palinología y los sanitarios. En el segundo nivel se encuentra una zona de cafetería, un herbario, la zona recepción de plantas, el área de cuarentena, la sala de usos múltiples y la biblioteca.

El cálculo de las cargas térmicas es primordial para la selección y dimensionamiento de las diferentes bombas de calor a instalar en el sistema, así como para el dimensionamiento de los ductos de aire y del sistema de intercambiadores de calor geotérmico. En este caso se decidió utilizar una configuración de intercambiadores de calor de tipo horizontal. En la Figura 1 está una vista del complejo real y en la

Figura 2 el modelo virtual creado en Revit.

La construcción del modelo en la plataforma Autodesk Revit®, se realizó específicamente mediante la técnica de Modelado de Información para la Construcción (BIM por sus siglas en inglés), e incluye funciones de diseño arquitectónico, ingeniería estructural, MEP y construcción. BIM es el proceso de generación y gestión de datos del edificio durante su ciclo de vida, utilizando software dinámico de modelado de edificios en tres dimensiones y en tiempo real, para disminuir el tiempo y recursos en el diseño, construcción y cálculo. Este proceso produce el modelo de información del edificio (también abreviado BIM), que abarca su geometría, sus relaciones espaciales, la información geográfica, así como las cantidades y las propiedades de sus componentes. El software cuenta con una base de datos climáticos internacionales, lo cual permite que el software pueda ubicar la región exacta de la edificación, y su orientación. Al detallar cada componente interno del modelo, el software es capaz de determinar las cargas térmicas a lo largo del año y con ello se conocen las cargas necesarias en verano e invierno que se emplearán para dimensionar el intercambiador de calor geotérmico.

Por lo tanto, en esta plataforma es posible realizar el cálculo de cargas térmicas tanto para verano como invierno, situar a detalle la ubicación del complejo para aumentar la exactitud del cálculo de cargas térmicas debidas a incidencias solares en paredes, techos y ventanas, así como infiltraciones debido a las corrientes de aire de la zona en cuestión. Además es posible calcular las dimensiones de los ductos de distribución de aire y valores de las densidades de flujo del complejo en su totalidad. Como ejemplo, en la Tabla 1 se muestra un resumen de los resultados obtenidos del cálculo de los valores de las cargas térmicas del herbario, que resultó ser el espacio prioritario a climatizar de todo el complejo, como se explica abajo. Puede verse que el valor máximo de carga de refrigeración es de 73.9 kW y que la carga máxima de calefacción es de 1.29 kW, con lo que el requerimiento de estas instalaciones será primordialmente en el modo refrigeración.

Tabla 1. Resumen del cálculo de las cargas térmicas de Herbario

<b>Entradas</b>	
Tipo de construcción	Escuela o Universidad
Área (m <sup>2</sup> )	756.16
Volumen (m <sup>3</sup> )	2,080.20
<b>Resultados del Cálculo</b>	
Valor máximo de carga total de refrigeración (W)	<b>73,906</b>
Valor máximo de refrigeración (mes y hora)	Mayo, 02:00 p. m.
Valor máximo de carga sensible de refrigeración (W)	65,602
Valor máximo de carga latente de refrigeración (W)	8,304
Capacidad máxima de refrigeración (W)	73,906
Valor máximo de flujo de aire de refrigeración (l/s)	5,821
Valor máximo de carga de calefacción (W)	<b>1,286</b>
Valor máximo de flujo de aire de calefacción (l/s)	5,572
<b>Comprobación de Sumas</b>	
Densidad de la carga de refrigeración (W/m <sup>2</sup> )	97.74
Densidad del flujo de refrigeración (l/(s·m <sup>2</sup> ))	7.7
Flujo/carga de refrigeración (l/(s·kW))	78.77
Área/carga de refrigeración (m <sup>2</sup> /kW)	10.23
Densidad de la carga de calefacción (W/m <sup>2</sup> )	1.7
Densidad del flujo de calefacción (l/(s·m <sup>2</sup> ))	7.37

## ANÁLISIS DEL MODELO VIRTUAL DEL COMPLEJO

Para seleccionar los espacios prioritarios a climatizar en el complejo, se hizo un análisis de las necesidades de carga de cada espacio. Analizando los valores de carga térmica se determinó que el valor más alto de carga en los dos modos de operación (refrigeración y calefacción) es el generado por el herbario, seguido del valor de carga térmica de la biblioteca y después por todos los laboratorios de la parte inferior. Los espacios menos prioritarios de acuerdo con sus necesidades de carga son la sala de usos múltiples y la sala de montaje, lo cual se aprecia en la Figura 3.

La Figura 4 muestra las cargas térmicas de calefacción, notándose que los espacios que tienen mayor carga son la biblioteca, la sala de usos múltiples y de montaje, y la zona de recepción de plantas. Esto se debe a que son zonas con gran incidencia solar por las ventanas y de conducción por techo y paredes, con lo cual serán las zonas de prioridad para el sistema de acondicionamiento.

En la Figura 5 se muestra el promedio mensual de cargas térmicas, en mega Joules, en modo refrigeración. Estas cargas se deben a la transferencia de calor generada por los ocupantes, equipos eléctricos y equipos de laboratorio, pero además se consideran las ganancias de calor debido a las ventanas y a las incidencias del sol, y la transferencia de calor por las paredes del recinto, techos y suelos. Como se puede notar, los meses en los cuales se requerirá mayor uso del modo frío serán entre mayo y octubre de cada año.

En la Figura 6 se observa el promedio mensual de cargas térmicas en modo calefacción, que igualmente toman en cuenta los mismos elementos del modo refrigeración, es decir la transferencia de calor emitida por los ocupantes, equipos eléctricos y equipos de laboratorio, las ganancias de calor por las ventanas y a las incidencias del sol, y la transferencia de calor por las paredes del recinto, techos y suelos. Se puede notar en la Figura 6 que los meses en los cuales se utilizara el sistema en modo calor serán entre noviembre y marzo.

En este punto conviene recordar que las bombas de calor geotérmico requieren consumir energía eléctrica para su funcionamiento. Por lo tanto, la Figura 7 presenta los consumos de energía eléctrica esperados a lo largo del año, observándose que los máximos consumos han de ocurrir en los meses de diciembre a marzo. En estos meses no funciona el horario de verano y hay menos horas de iluminación solar, lo que implica un mayor consumo eléctrico.

## Dimensionamiento del intercambiador de calor

Como se mencionó, para dimensionar los intercambiadores se empleó el software Ground Loop Design (GLD), que consta principalmente de tres módulos centrales: módulo de diseño de pozo, módulo de diseño horizontal y módulo de diseño de agua en superficie (GLD, 2015).

El módulo de diseño de pozo se emplea para dimensionar intercambiadores verticales, y tiene dos modos: uno de temperatura fija, que módulo modela profundidad de perforación que se requerirá para un sistema de intercambiador de pozo vertical, y otro de profundidad fija, que modela las temperaturas de entrada para una longitud de campo de perforación definido por el usuario. Además, el módulo de diseño de pozo puede modelar y representar gráficamente las temperaturas de entrada mensuales y horarias para el diseño, si se han introducido datos de cargas mensuales o por hora en el módulo de cargas promedio.

Un segundo módulo del GLD es el de diseño horizontal. Tiene también un modo de temperatura fija,

que determina la longitud de tubería requerida para un sistema horizontal. En el modo de área fija, modela las temperaturas de entrada para un área definida por el usuario y la configuración de tuberías, excluyendo la configuración tipo *slinky*. Además, el módulo de diseño horizontal puede calcular y graficar la evolución de la temperatura de entrada basándose en las cargas diarias según el diseño.

Finalmente, el módulo de diseño de agua de superficie del GLD se utiliza cuando el intercambiador de calor no se va a enterrar en el suelo sino que se colocará en un cuerpo de agua superficial (un lago, una pequeña presa, etc.). Este módulo determina la longitud de tubería en el bucle cerrado que se colocará en el cuerpo de agua superficial, el cual será el medio de intercambio de calor.

En el caso aquí presentado se utilizó el módulo de diseño horizontal del GLD para dimensionar el intercambiador de calor. Para alimentar este módulo se emplearon los valores de las cargas térmicas mencionadas, obtenidos por el software Revit®. En la Figura 8 se presentan las cargas térmicas mensuales, tanto para refrigeración como para calefacción, que se cargaron en el GLD.

## RESULTADOS

La Figura 9, muestra la distribución esperada del gasto de energía eléctrica del complejo, donde se nota que el 43% de la energía sería para utilizada para la activación de las bombas de calor (HVAC), otro 25% se empleará para la iluminación, mientras que los equipos extras consumirán el porcentaje restante, equivalente al 32%.

En la Figura 10 están los valores de los picos máximos del consumo de energía eléctrica del complejo en cada mes. Se observa que la tendencia de la curva es similar a la de la gráfica de los consumos totales de energía que se presentó en la Figura 7.

La Figura 11 muestra las temperaturas mensuales promedio de bulbo seco, así como el calor para los modos de refrigeración y calefacción del sistema. Con estos datos es posible hacer los cálculos para dimensionar el sistema de ductos de distribución de aire, así como la selección de las bombas de calor y el dimensionamiento de los intercambiadores de calor geotérmico.

La Figura 12, muestra los promedios diurnos de la temperatura del ambiente con los cuales se calculan las pérdidas o ganancias de calor del sistema. Los datos incluyen la temperatura de bulbo seco, bulbo húmedo y las ganancias por incidencias solares directas o difusas. Todos los datos se obtuvieron de estaciones meteorológicas ubicadas en la ciudad de Morelia, Michoacán.

En la Figura 13, se muestra el comportamiento de la humedad ambiente de la zona cercana al edificio, a lo largo de los meses. Con estos datos se puede estimar la cantidad de calor latente que debería tener el sistema para disminuir la humedad del complejo.

## Cálculo del dimensionamiento de los intercambiadores de calor

Después de obtener los valores de la carga térmica bajo las cuales estará operando todo el complejo, se comenzó con el dimensionamiento de los intercambiadores de calor, para lo que se utilizó, como se comentó antes, el software comercial GLD 2014. En el software se debe especificar el tipo de intercambiador a instalar, las características físicas del intercambiador, las especificaciones del tipo suelo, y el tipo de refrigerante a utilizar en los intercambiadores, que en este caso sería agua. Después de ingresar todos los valores requeridos para la simulación, se introdujeron también las cargas térmicas, que habían sido calculadas por el software Revit® 2015.

Como se ha dicho, el intercambiador de calor a emplear es del tipo trinchera horizontal con una configuración *slinky*, con el cual el terreno se convierte en un sumidero térmico. La tubería a emplear para el intercambiador es de polietileno de alta densidad (PAD) de 1" de diámetro. El gruteo es una mezcla de concreto, arena sílica y agua, y el material de los alrededores del terreno es el mismo que se encuentra en él.

El suelo de la zona presenta una conductividad térmica promedio de 0.8657 W/(m°K), y la resistencia térmica del intercambiador es de 0.3048 °K/(W/m). Estos valores se obtuvieron a partir de las muestras de los recortes de una perforación tipo vertical, en la que se introdujeron intercambiadores de calor verticales. El flujo volumétrico que opera dentro del sistema es el recomendado por IGSHPA (Remund et al., 2011), de 1.9962 l/s. La conductividad térmica del agua es de 0.593 W/(m°K) y su capacidad calorífica de 4173.36 kJ/(°Km³).

En la Figura 14 se muestra el esquema del intercambiador de calor propuesto. Los cálculos, por su parte, se realizaron de forma analítica, de acuerdo con las ecuaciones 1 a 5 siguientes.

$$L_p = Nl * Ll + Nl * 2P + \frac{\pi d}{2} + d \quad (1)$$

Donde:

$L_p$  = Longitud de la tubería (m)

$Nl$  = Número de lazos

$Ll$  = Longitud del lazo diámetro (m)

$P$  = Espaciamiento (m)

$d$  = Diámetro del lazo (m)

$L(t - h)$  = Longitud final de la trinchera hacia el cabezal (m)

$$Nl = \left[ L_p - d \left( \frac{\pi}{2} + 1 \right) \right] / (Ll - 2P) \quad (2)$$

$$L_t = (Nl * P) + d \quad (3)$$

$L_t$  = Longitud de la trinchera (m)

$$L_t + L(t - h) = \text{Longitud total de la trinchera (m)} \quad (4)$$

$$L_p + 2 * L(t - h) = \text{Longitud total de la tubería (m)} \quad (5)$$

Los parámetros de la tubería incluyen su conductividad térmica y sus dimensiones, tales como diámetros exterior e interior y la cédula, además del tipo de flujo interno de la tubería.

Para configurar los intercambiadores de calor el software cuenta con diferentes tipos de trincheras. Para este estudio se utilizó la trinchera tipo *slinky*, que es un serpentín de tuberías. Este tipo requiere menos espacio que otros y para este caso se utilizan sólo 4 líneas con una separación de 6.1 m entre ellas, a una profundidad de 1.8 m y un ancho de 20 cm. En sí, el intercambiador de calor tipo *slinky* tiene un diámetro de 91 cm y una separación entre ellos de 52 cm.

El paso siguiente es cuantificar las ganancias de calor del sistema por el uso de bombas y equipos auxiliares. En este caso sólo se instalará una bomba de calor de 2.5 hp, suficiente para desplazar todo el fluido desde la bomba hasta los intercambiadores de calor y de regreso.

Después de la introducir los parámetros requeridos por el software, se realizan varias iteraciones, al igual que en el cálculo anterior, para cuantificar finalmente las dimensiones del sistema. El resultado



fue que se requerirán 4 trincheras, con una longitud total de 101 m, por lo cual cada trinchera tendrá una longitud de 25.3 m. La longitud total de las tuberías de los intercambiadores del sistema será de 1347.6 m.

## CONCLUSIONES

El propósito de este trabajo fue obtener las dimensiones de un sistema de acondicionamiento de ambiente de un edificio de laboratorios propiedad de la UMSNH en Morelia, Mich., empleando bombas de calor geotérmico con intercambiadores de calor tipo horizontal. El objetivo fue demostrar en la práctica la viabilidad de estos sistemas en nuestro territorio, pero además aprender las capacidades técnicas y operativas mediante un trabajo multidisciplinario. Para ello se utilizaron diferentes paquetes de software, como el Autodesk Revit® y el GLD®, y se desarrolló una metodología para su integración. Con ello se modeló el edificio de forma detallada y se calcularon las cargas térmicas y las dimensiones de los intercambiadores de calor. Habrá cuatro intercambiadores con longitud de 25.3 m cada uno, a una distancia de separación de 6.1 m. La longitud total del sistema de tuberías será de 1347.6 m, lo que permitirá suministrar la energía necesaria al momento de ser interconectada a la bomba de calor y al sistema de distribución de aire dentro del complejo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean reconocer al Fondo de Sustentabilidad Energética SENER-CONACyT por el apoyo y financiamiento de los del CeMIE-Geo, y particularmente del proyecto P-30 del cual este estudio forma parte.

## REFERENCIAS

- Atam, E., and L. Helsen, 2015. Ground-coupled heat pumps: Part 1 – Literature review and research challenges in modeling and optimal control. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 54, pp. 1653-1667.
- GDL 2015. User's Manual Studio 2014.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., R. Maya-González, and J.L. Quijano-León, 2015. Present Situation and Perspectives of Geothermal in Mexico. *Proceddings World Geothermal Congress*, Melbourne, Australia, April 19-25, 2015.
- Lund, J., and T. Boyd, 2015. Direct Utilization of Geothermal Energy 2015: Worldwide Review. *Proceddings World Geothermal Congress*, Melbourne, Australia, April 19-25, 2015.
- Parlamento Europeo, 2010. *DIRECTIVA 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la eficiencia energética de los edificios*.
- Remund, C., R. Carda, P. Rawlings, and J. Bose, 2011. *Ground source heat pump residential and light commercial design and installation guide*. Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.

## FIGURAS EN LAS PÁGINAS SIGUIENTES



*Fig. 1. Vista del edificio a climatizar.*



*Fig. 2. Modelo del mismo edificio, creado con Revit®.*



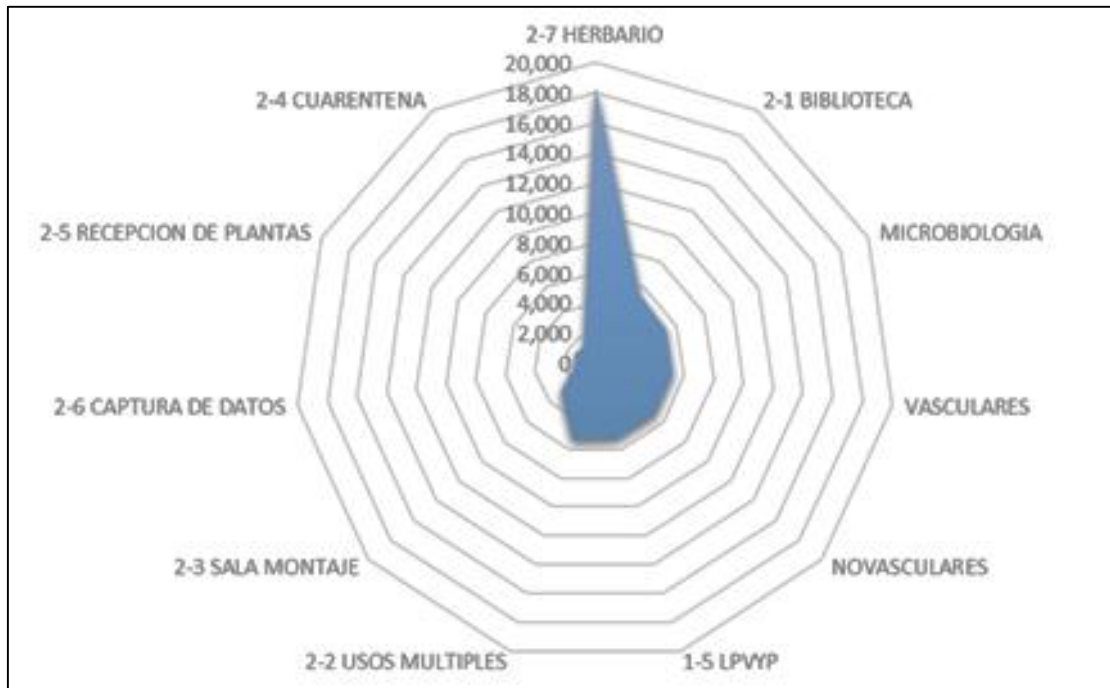


Fig. 3. Cargas térmicas totales de cada espacio del edificio.

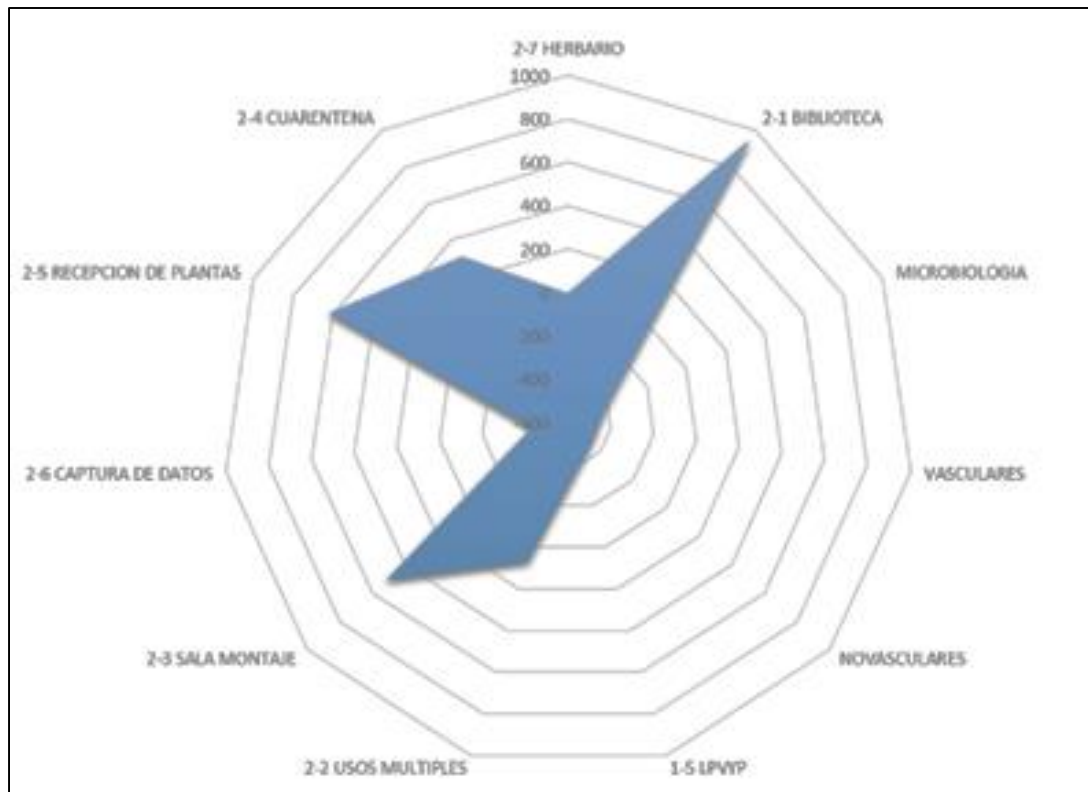


Fig. 4. Cargas térmicas para el modo calefacción de cada espacio.

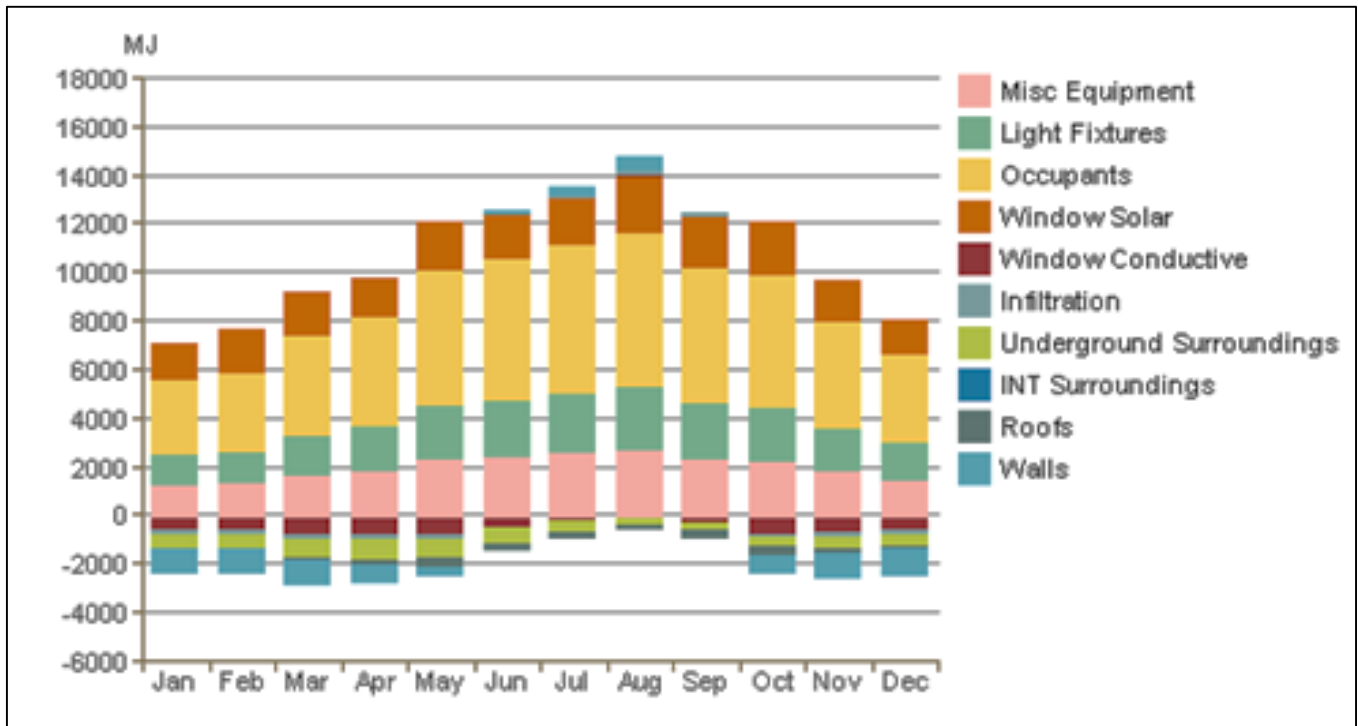


Fig. 5. Promedio mensual de cargas térmicas en modo refrigeración por cada componente principal-

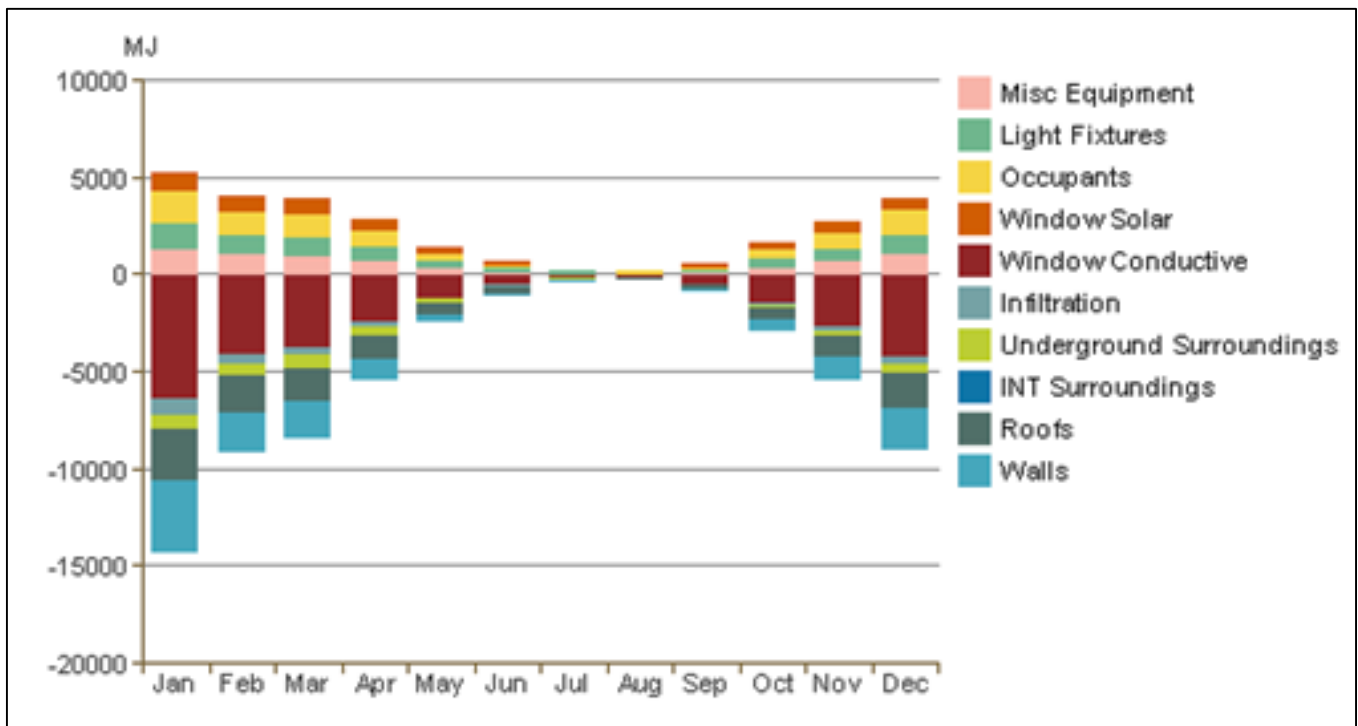


Fig. 6. Promedio mensual de cargas térmicas en modo de calefacción, por cada componente principal.

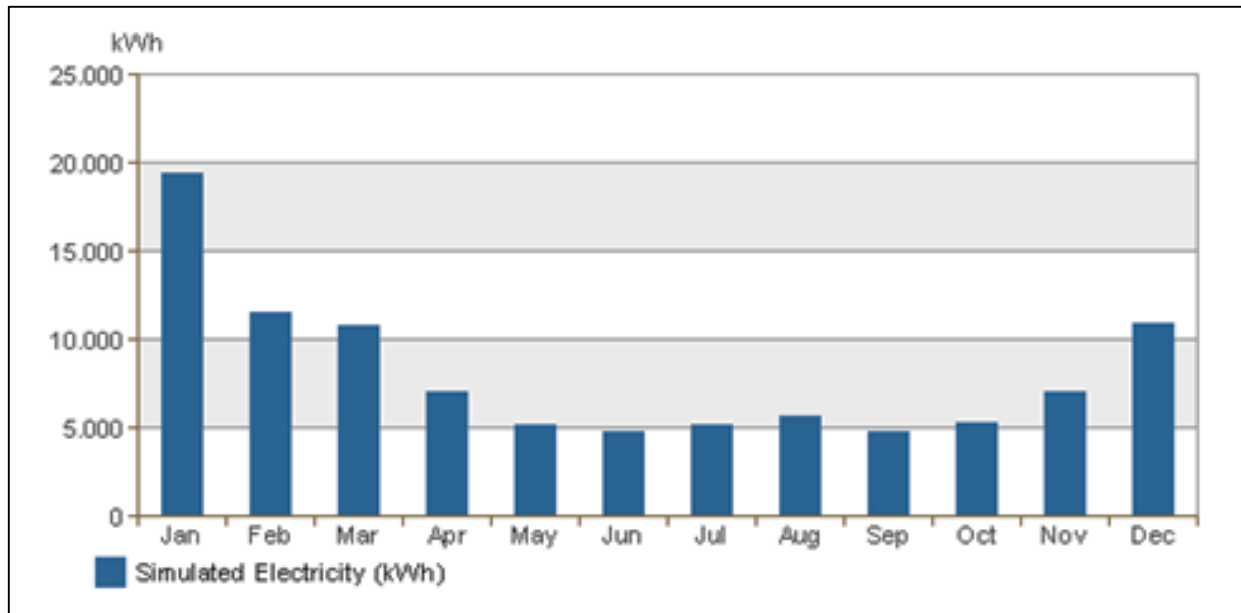


Fig. 7. Consumo esperado de energía eléctrica a lo largo del año.

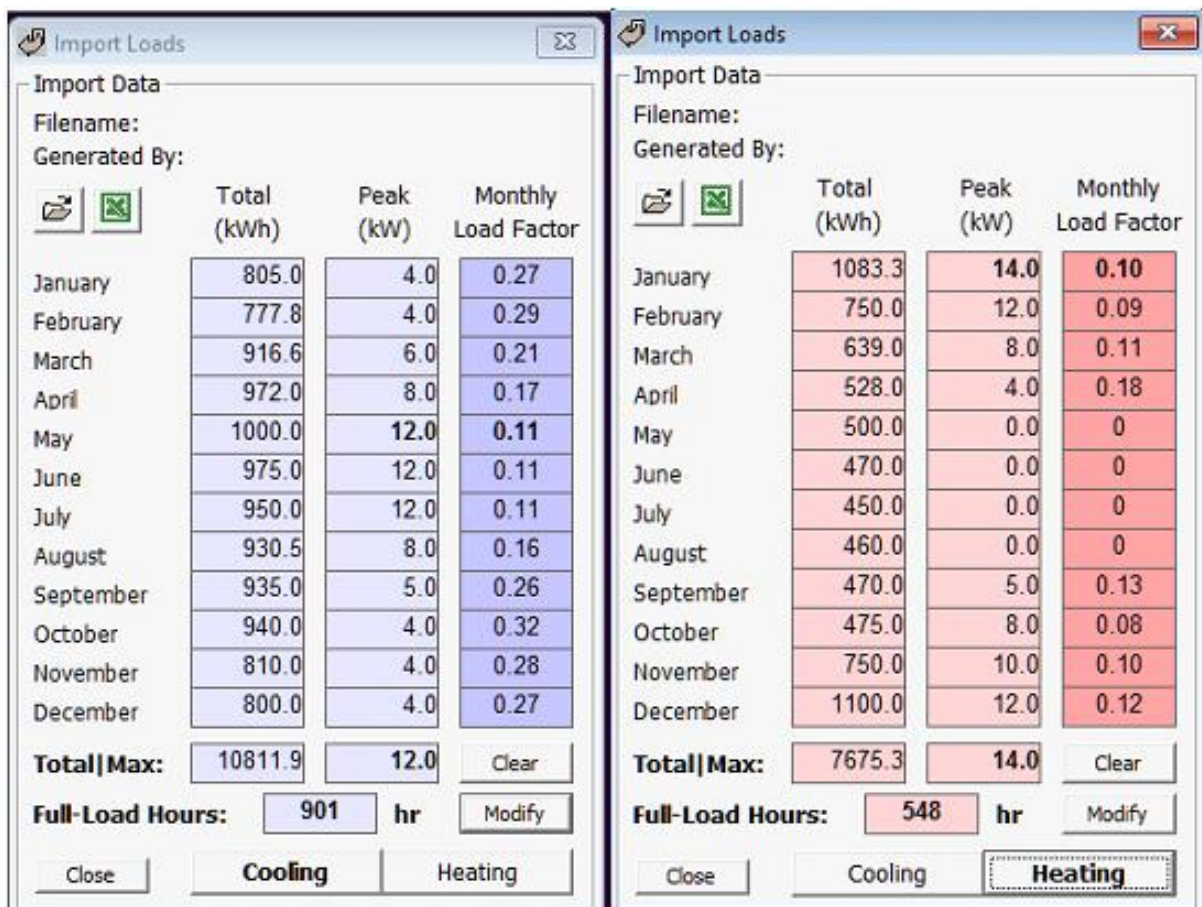


Fig. 8. Cargas térmicas mensuales para enfriamiento (izquierda) y calefacción capturadas en el GLD.

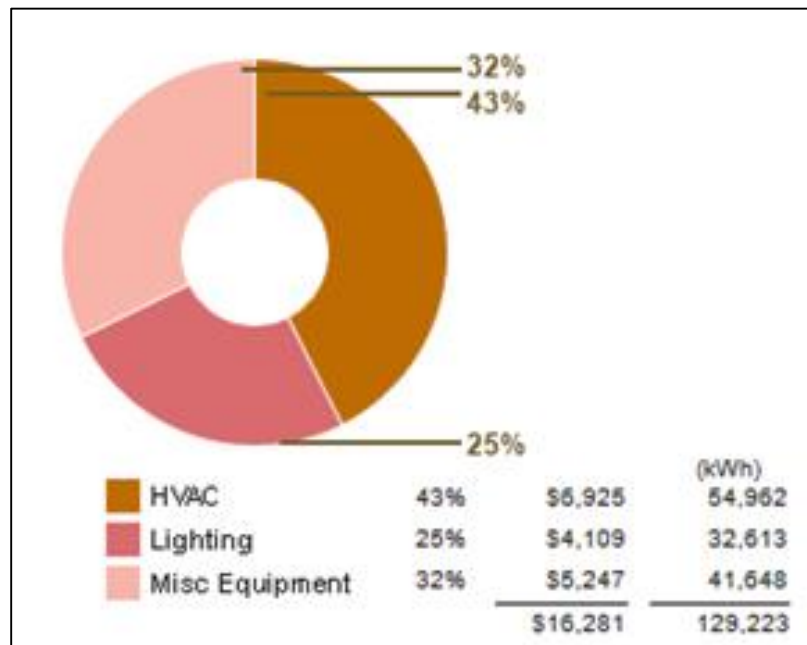


Fig. 9. Distribución esperada del consumo de energía eléctrica del edificio.

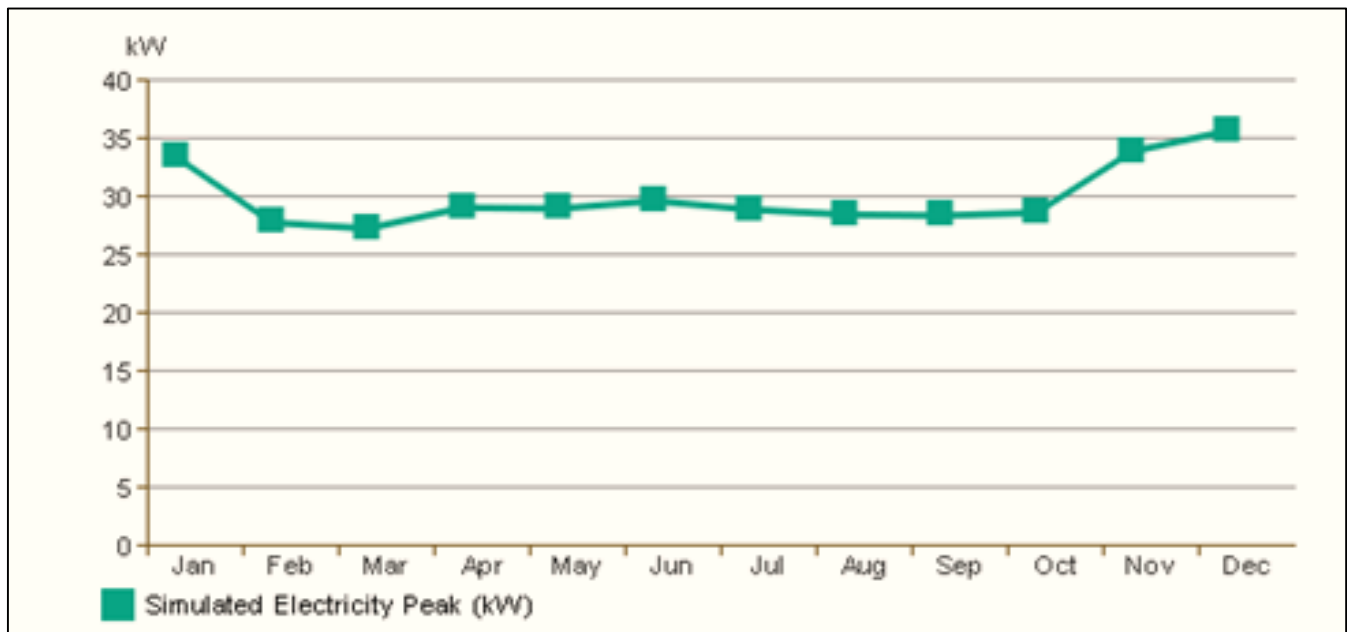
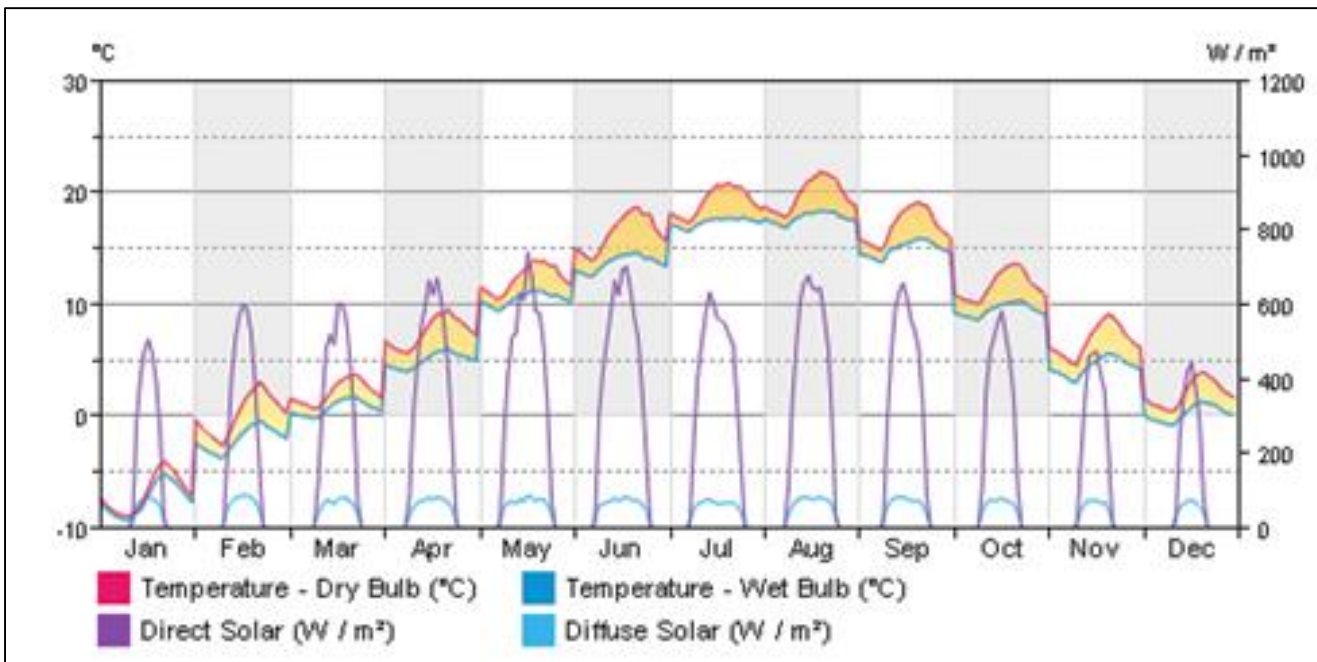
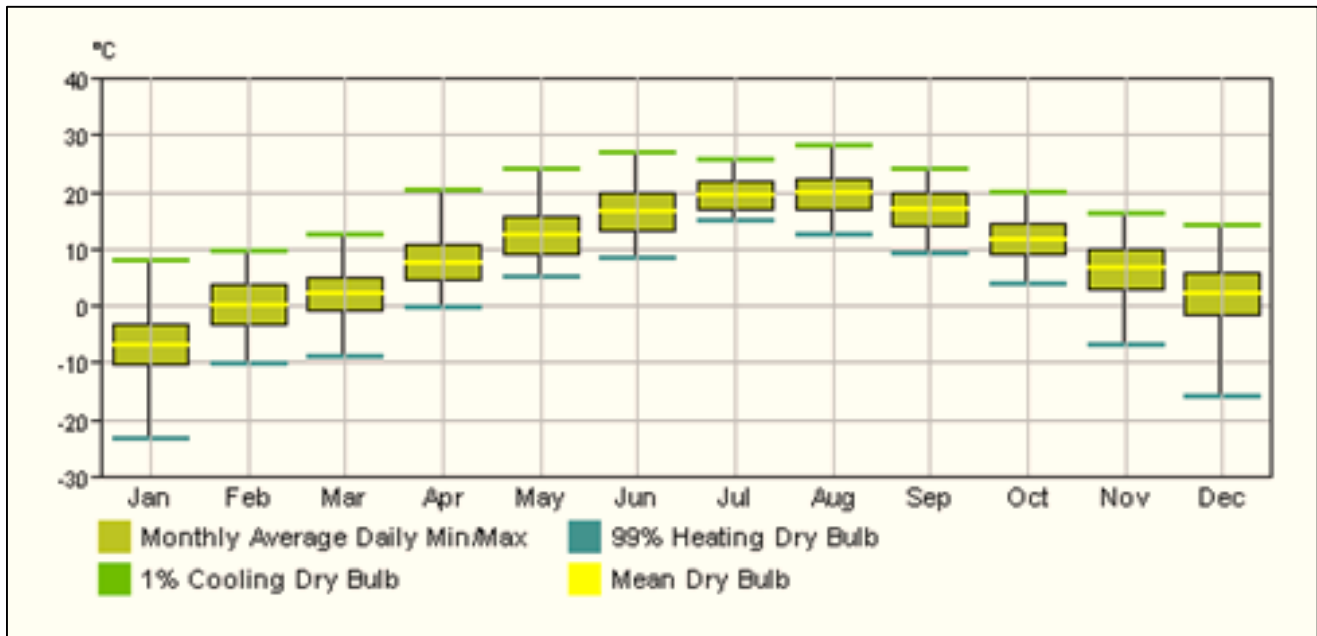


Fig. 10. Picos máximos esperados en el consumo mensual de energía eléctrica mensual.





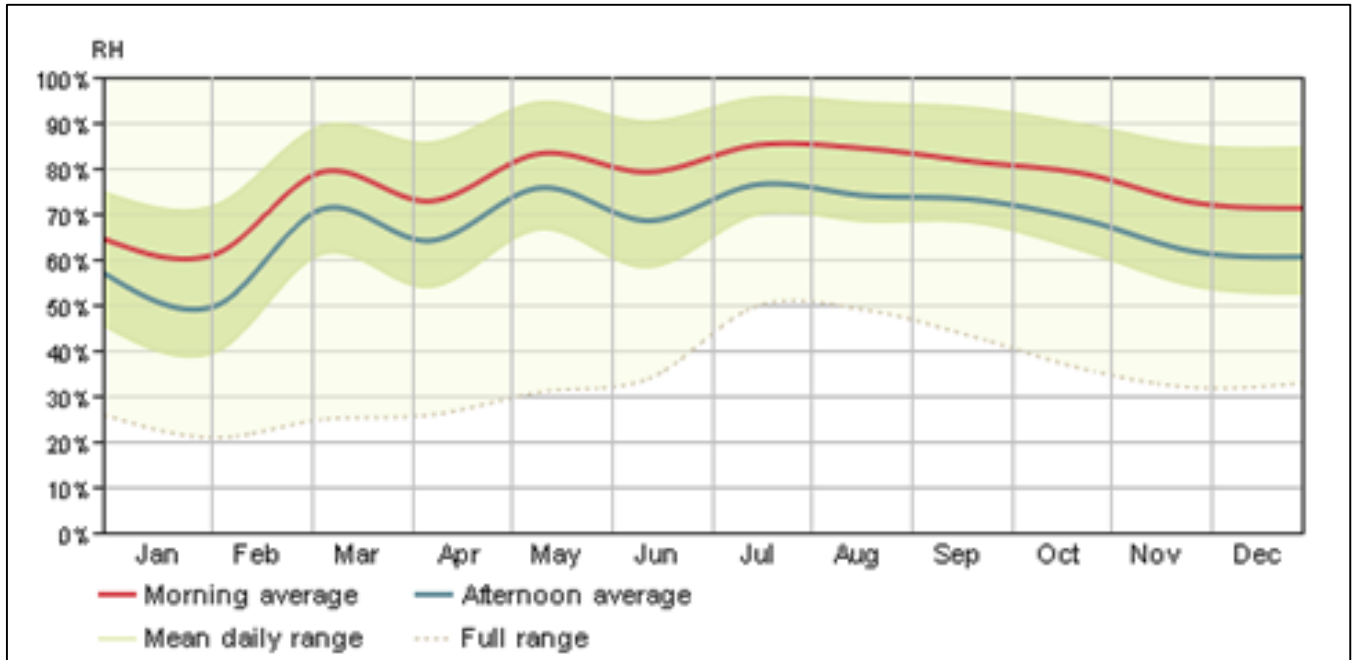


Fig. 13. Promedio diario y variación de la humedad ambiental matutina y vespertina a lo largo del año.

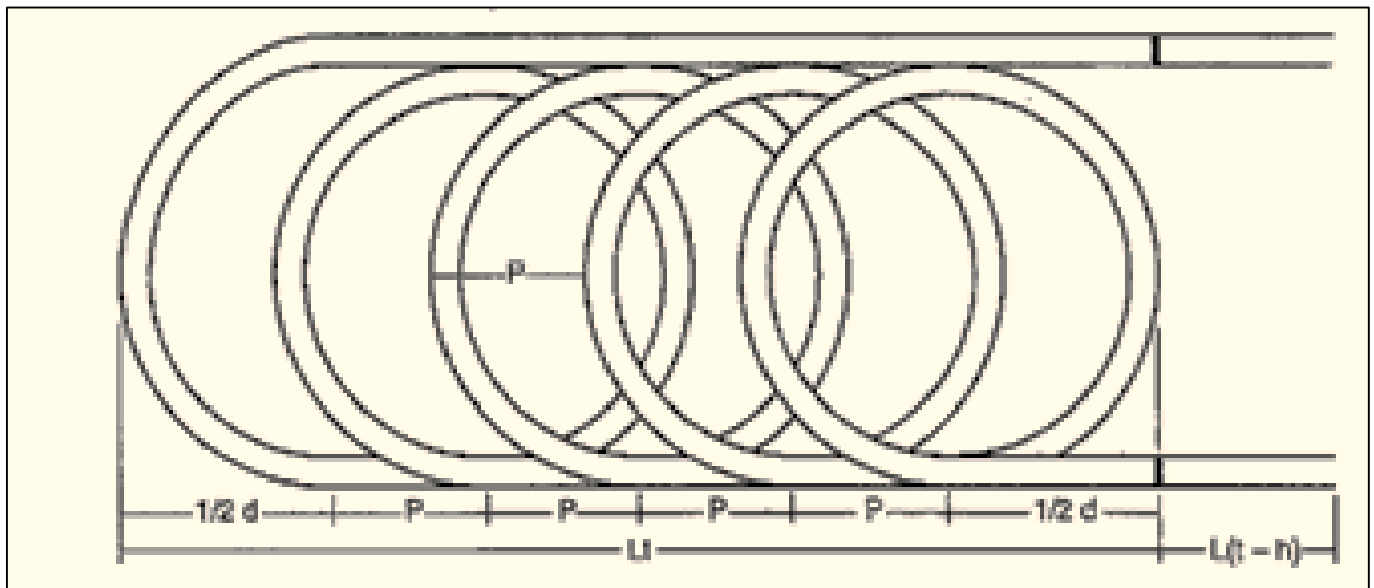


Fig. 14. Esquema del intercambiador de calor horizontal propuesto, tipo slinky. Claves:  $d$ : Diámetro del lazo,  $L_t$ : Longitud de la trinchera,  $L(t-h)$ : Longitud final de la trinchera hasta el cabezal de la bomba,  $P$ : Espaciamiento entre cada lazo.