



Trabajo Fin de Máster

INTERCAMBIADORES DE CALOR TIERRA-AIRE.

CASO PRÁCTICO: EDIFICIO DE LA NUEVA
UNIDAD DE URGENCIAS EN EL HOSPITAL SAN
JORGE DE HUESCA

EARTH-TO-AIR EXCHANGERS. PRACTICAL CASE:
BUILDING OF THE NEW EMERGENCY UNIT AT
THE SAN JORGE HOSPITAL IN HUESCA

Autor/es

Julia Alonso Martín

Director/es

Carlos Miguel Monné Bailo

Titulación del autor

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Escuela de Ingeniería y Arquitectura / Universidad de Zaragoza
2023-2024

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Máster analiza el comportamiento y la eficiencia energética del intercambiador tierra-aire, conocido como pozo canadiense, instalado en la nueva Unidad de Urgencias del Hospital San Jorge de Huesca. Este sistema utiliza las propiedades térmicas del subsuelo para pretratar el aire primario de ventilación, representando una solución sostenible para optimizar el consumo energético en edificios.

La investigación se estructura en varias fases: revisión bibliográfica para contextualizar la tecnología, estudio comparativo con sistemas similares en Aragón, análisis detallado del funcionamiento del sistema en el Hospital San Jorge y propuestas de mejora. Se recopilaron datos entre enero de 2023 y octubre de 2024, incluyendo temperaturas, humedades relativas y presión en diferentes puntos del sistema, identificando períodos de inactividad que evidencian la necesidad de un mantenimiento regular y un buen sistema de control.

Los resultados confirman que los intercambiadores tierra-aire son especialmente útiles en edificios de gran demanda de aire primario, aunque requieren de una mayor inversión inicial. Este coste se ve compensado por su rendimiento estacional y los ahorros energéticos a largo plazo. Las mejoras propuestas podrían aumentar aún más su eficiencia y sostenibilidad, haciendo de esta tecnología una alternativa viable para la reducción del consumo de sistemas de climatización en edificaciones futuras.

ABSTRACT

This Master's Thesis analyzes the performance and energy efficiency of the ground-air exchanger, known as Canadian well, installed in the new Emergency Unit of the San Jorge Hospital in Huesca. This system uses the thermal properties of the subsoil to pre-treat the primary ventilation air, representing a sustainable solution to optimize energy consumption in buildings.

The research is structured in several phases: literature review to contextualize the technology, comparative study with similar systems in Aragon, detailed analysis of the operation of the system in the San Jorge Hospital and proposals for improvement. Data were collected between January 2023 and October 2024, including temperatures, relative humidity and pressure at different points of the system, identifying periods of inactivity that show the need for regular maintenance and a good control system.

The results confirm that ground-to-air exchangers are particularly useful in buildings with high primary air demand, although they require a higher initial investment. This cost is offset by their seasonal performance and long-term energy savings. The proposed improvements could further increase their efficiency and sustainability, making this technology a viable alternative for reducing the consumption of air conditioning systems in future buildings.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	4
2	ESTADO DEL ARTE	5
2.1	Comportamiento del suelo	5
2.2	Funcionamiento.....	6
2.3	Partes de los pozos canadienses	7
2.4	Parámetros de diseño	8
2.5	Ventajas de los pozos canadienses.....	10
2.6	Edificios con pozos canadienses	10
3	EDIFICIOS ARAGÓN.....	12
3.1	CIEM, Zaragoza.....	12
3.2	Facultad de Filosofía y Letras, Zaragoza.....	13
3.3	Hospital de Barbastro.....	14
3.4	Hospital San Jorge, Huesca.....	15
3.5	Comparativa	18
4	HOSPITAL DE HUESCA	19
4.1	Condiciones del terreno	19
4.2	Análisis de datos	21
4.2.1	Temperaturas	22
4.2.2	Potencia térmica	23
4.2.3	Consumo eléctrico	25
4.2.4	Condensación	26
4.2.5	Funcionamiento	28
4.2.6	Días tipo.....	33
4.2.7	Análisis energético	34
5	PROPUESTAS DE MEJORA.....	37
5.1	Propuesta 1	37
5.2	Propuesta 2	38
5.3	Propuesta 3	38
5.4	Propuesta 4.....	41
5.5	Propuesta 5.....	39
5.6	Comparativa	41
6	CONCLUSIONES.....	43
7	BIBLIOGRAFÍA.....	45
	ANEXO I. GRÁFICAS	47

1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo principal el estudio del comportamiento y análisis energético del intercambiador tierra-aire, también conocido como pozo canadiense, instalado en la nueva Unidad de Urgencias del Hospital San Jorge de Huesca. Este sistema, que aprovecha las propiedades térmicas del subsuelo para pretratar el aire primario de ventilación, se analiza en profundidad para comprender su rendimiento energético y proponer mejoras que puedan aplicarse en futuras construcciones.

El contexto del estudio está enmarcado en la creciente necesidad de optimizar los sistemas de climatización y ventilación en edificios. Los intercambiadores tierra-aire representan una alternativa sostenible para reducir el consumo energético en sistemas de ventilación, contribuyendo a objetivos globales de descarbonización. Este proyecto se lleva a cabo en colaboración con la infraestructura sanitaria del Hospital San Jorge, donde el sistema se encuentra en operación.

Desde el punto de vista metodológico, se estructura en las siguientes fases:

1. Revisión del estado del arte: Se realiza un análisis bibliográfico de investigaciones científicas sobre intercambiadores tierra-aire para contextualizar la tecnología y sus aplicaciones actuales.
2. Estudio regional: Se identifican y estudian otros sistemas similares implementados en Aragón, proporcionando una referencia local que complementa el análisis.
3. Análisis de datos: Con la base de datos recopilada del sistema del Hospital San Jorge, se evalúa el comportamiento térmico y la eficiencia energética del sistema, destacando puntos de mejora.
4. Propuestas de mejora: A partir de los hallazgos, se sugieren soluciones y modificaciones orientadas a incrementar el rendimiento de los sistemas de intercambiadores tierra-aire en futuras implementaciones.

En términos generales, esta memoria se organiza como sigue: tras esta introducción, en el capítulo 2 se presenta un estado del arte detallado sobre los pozos canadienses, explorando su funcionamiento, diseño, ventajas, y aplicaciones prácticas, proporcionando así una base teórica sólida. Posteriormente, en el capítulo 3, se aborda un estudio comparativo de sistemas implementados en edificios de la Comunidad Autónoma de Aragón, lo que permite contextualizar el caso de estudio principal dentro de un marco regional. El núcleo del trabajo se desarrolla en el capítulo 4, en el que se realiza un análisis del sistema del Hospital de Huesca, donde se evalúan datos clave como temperaturas, potencia térmica, consumo eléctrico y eficiencia energética. Este análisis se complementa con la clasificación de patrones operativos en días tipo. A partir de estos resultados, se proponen mejoras prácticas divididas en cinco estrategias específicas, evaluando su viabilidad y comparando su impacto en términos de rendimiento y sostenibilidad. Finalmente, los anexos recogen datos complementarios y aspectos técnicos adicionales que respaldan el trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

Los pozos canadienses, también llamados pozos provenzales, son sistemas de intercambio de calor tierra-aire que aprovechan la energía térmica del subsuelo para pretratar el aire de ventilación, contribuyendo a reducir la temperatura del aire en verano y a aumentarla en invierno en los edificios donde se instalan.

Estos sistemas consisten en una serie de tubos dispuestos horizontalmente a cierta profundidad bajo tierra, por los cuales circula el aire, produciéndose un intercambio de calor entre este y la tierra circundante. En invierno, cuando el aire exterior es más frío, la tierra a poca profundidad tiene una temperatura mayor que en la superficie, lo que permite que, al pasar el aire frío por los tubos, la tierra ceda calor y caliente el aire. En cambio, en verano, cuando la temperatura del aire es mayor que la del subsuelo a pocos metros de profundidad, el aire que circula por los tubos cede calor a la tierra, enfriándose.

Los pozos canadienses resultan muy eficientes para refrigerar durante el verano, ofreciendo una alternativa viable a los sistemas convencionales de aire acondicionado con un menor consumo energético. Por otra parte, en invierno los pozos pueden ser insuficientes por sí solos para calefactar completamente un edificio, sin embargo, proporcionan un importante precalentamiento del aire de forma que el salto térmico que tendrá que aportar el sistema de climatización artificial será menor, resultando en un ahorro significativo de energía.

Además, cabe añadir que la efectividad de los pozos canadienses puede variar según la ubicación, siendo más eficientes en invierno en algunos lugares y en verano en otros.

Los tubos canadienses son un sistema de bajo consumo eléctrico, por lo que, tras su instalación, la climatización del edificio será más económica, ya que logra reducir la demanda energética de forma significativa. Es una tecnología natural de bajo coste, ecológica, eficiente y sostenible.

2.1 Comportamiento del suelo

La temperatura superficial del suelo varía dependiendo de la ubicación geográfica y de las condiciones climáticas locales, sin embargo, a una determinada profundidad la temperatura permanece constante a lo largo del año, reflejando la temperatura media del lugar.

La estabilidad térmica del suelo aumenta progresivamente con la profundidad, reduciendo las fluctuaciones entre verano e invierno conforme mayor profundidad haya. En torno a los 2 metros de profundidad las temperaturas se encuentran en los rangos ideales para el confort humano en viviendas (entre 18°C y 24°C), y a partir de los 10 o 15 metros la temperatura es prácticamente constante durante todo el año. Desde los 60-80 metros de profundidad en adelante, la temperatura comienza a incrementar con la profundidad a unos 15-30°C/km generalmente.

Otra característica notable del subsuelo es su gran capacidad para almacenar calor debido al desfase con respecto a la temperatura externa del aire. Por lo tanto, durante el cambio de estaciones, el subsuelo retiene más calor después de los meses cálidos y más frescura después del invierno. Lo mismo sucede diariamente, ya que el subsuelo retiene más calor después de las horas de sol y más frescura después de la noche. Esto es debido a la inercia térmica del suelo, principio bajo el que operan los pozos canadienses para pretratar la temperatura del aire utilizado en la vivienda.

La geotermia de baja temperatura es un sistema que funciona aprovechando el almacenamiento de energía del terreno para mitigar las fluctuaciones externas, pero no debe concebirse como una fuente de calor ilimitada. Cuando se introduce un intercambiador de calor en el terreno, este altera las condiciones térmicas naturales, llevándolo hacia un nuevo estado de equilibrio, lo que provoca variaciones en la temperatura del terreno alrededor del intercambiador y puede afectar a su rendimiento. Por ello, este sistema no es adecuado para aplicaciones que requieran flujos de aire con temperatura de entrada constante durante largos períodos. Este efecto se denomina saturación térmica, y se produce cuando solo se emplea para calefactar o refrigerar, o cuando la temperatura de entrada es constante, ya que entonces la temperatura del terreno alrededor del intercambiador se estabiliza en niveles cercanos a la temperatura del aire entrante, reduciendo la capacidad de transferencia de calor.

Sin embargo, en condiciones de operación estándar, donde se introduce aire exterior de manera continua a lo largo del año, el sistema evita este efecto, y se beneficia de la inercia térmica del suelo.

2.2 Funcionamiento

En la Figura 1 se muestra una comparativa de las temperaturas del aire de ventilación con un recuperador de calor, y del mismo añadiendo pozos canadienses.

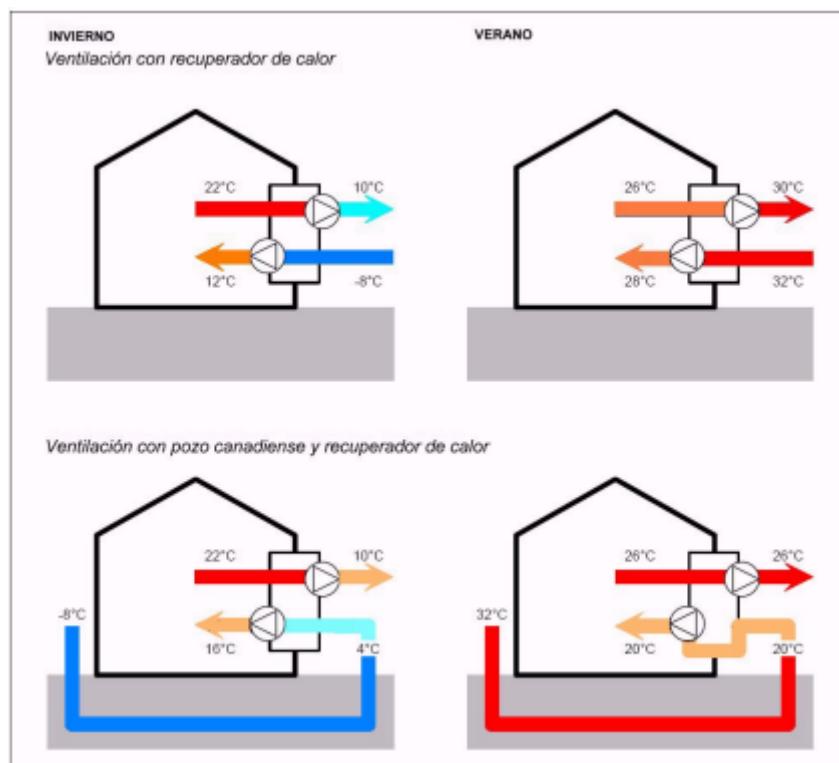


Figura 1: Ejemplo de ventilación con recuperador de calor y con pozos canadienses y recuperador. Fuente: [1].

En el funcionamiento de un intercambiador tierra-aire, se identifican ciertos factores que condicionan su eficacia, los cuales se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Las funciones de precalentamiento en invierno y refrigeración en verano se ven influenciadas por un desfase diario y otro estacional debidos a la inercia térmica

del subsuelo. Esta genera un desfase temporal alcanzando el subsuelo inmediato las temperaturas más frescas por la mañana después de la noche, y sus valores más cálidos por la tarde después del mediodía en primavera tras el invierno

- El almacenamiento de calor debido a las oscilaciones estacionales se propaga aproximadamente 3 metros alrededor de los conductos, mientras que la oscilación diaria se limita a unos 20 centímetros. Como resultado, las oscilaciones diarias tienen un impacto mayor que las estacionales, ya que estas últimas requieren mayor masa de almacenamiento y se encuentran limitadas por la difusión en profundidad.
- Los desfases se caracterizan por presentar una caída exponencial a lo largo de la longitud del tubo.
- Los sistemas basados en pozos canadienses operan en bucle abierto, donde el sistema de ventilación cumple la función tanto de recarga térmica como de distribución de aire.

2.3 Partes de los pozos canadienses



Figura 2:Partes de los pozos canadienses. Fuente: [2].

- **Punto de captación de aire:** Es el punto en el que el sistema coge el aire del exterior. La toma se debe situar ligeramente elevada, aproximadamente de 1 a 1,5 metros, y en áreas donde el aire circule con regularidad para evitar capturar aire estancado y contaminado. Estas dos medidas son especialmente importantes para prevenir la entrada de gas radón, un gas radioactivo que resulta perjudicial para la salud en altas concentraciones. El gas radón se genera de forma natural en toda la corteza terrestre, con mayor intensidad en las zonas volcánicas y graníticas. Dado que es más denso que el aire, tiende a acumularse en depresiones y cavidades cuando no hay corrientes de aire para dispersarlo. Además, se debe asegurar la estanqueidad del sistema para evitar que este gas se filtre hacia el interior de los

tubos. Por otra parte, la entrada debe estar protegida con una rejilla que impida el acceso de insectos, roedores u otros animales al sistema.

- **Filtros:** Se encargan de purificar el aire y evitar la entrada de polvo y suciedad al interior de los conductos.
- **Intercambiador de calor:** Lo componen los tubos enterrados, los cuales se encargan de transferir calor del subsuelo al aire. Sus dimensiones se determinan considerando diversos factores como la profundidad y la composición del suelo, la potencia del elemento que succiona el aire, las necesidades térmicas, etc.

Los tubos deben ser impermeables, herméticos, de superficie lisa, resistente a la presión y a la deformación del terreno, así como a la corrosión, y deben tener una buena conductividad térmica. Además, presentan una ligera inclinación para evitar la acumulación de agua, ya que en ciertas épocas del año podrían producirse condensaciones en su interior. Esta pendiente facilita el drenaje de agua por gravedad hacia un punto de salida.

La configuración del intercambiador puede variar en función del terreno disponible y los requerimientos térmicos.

- **Punto de drenaje:** Es el lugar en el que se elimina el agua condensada en los tubos. Si el sistema no tuviera filtros ni punto de drenaje, la acumulación de polvo con materia orgánica y humedad daría lugar a la proliferación de hongos y bacterias.
- **Circulador de aire:** Es el elemento que impulsa el aire y lo hace circular por los tubos enterrados. Se puede optar por elementos activos (mecánicos), como un ventilador, o pasivos, como una chimenea solar. Los extractores mecánicos y la chimenea solar no se excluyen mutuamente, pudiéndose complementar para obtener un mayor ahorro.

El aire de los tubos canadienses se puede conectar al sistema de ventilación de la vivienda, conectando la salida del pozo a la toma de aire del mismo. También es compatible su uso con sistemas de doble flujo y recuperador de calor.

2.4 Parámetros de diseño

Entre los parámetros de diseño que se deben controlar hay que considerar:

- **Material de los conductos:** No tiene una relevancia significativa desde el punto de vista térmico, ya que el factor limitante alrededor de los conductos es la conductividad del suelo. Sin embargo, es importante que el material sea lo suficientemente resistente al aplastamiento cuando se entierran los tubos. Los tubos corrugados ofrecen mayor resistencia estructural pero también mayor impedimento al flujo, aumentando el riesgo de acumulación de agua de condensación. Se han utilizado diversos tipos de materiales, como plásticos (PVC, PP, etc), hormigón pretensado, cerámica o tubos metálicos galvanizados.
- **Longitud de los tubos:** La transferencia de calor y el rendimiento del sistema son mayores cuanto más largos son los tubos. Sin embargo, dicha longitud no se puede prolongar indefinidamente para mejorar el rendimiento, ya que la temperatura de salida muestra un comportamiento asintótico respecto a la longitud del conducto. Esto permite definir una longitud máxima a partir de la cual cualquier incremento tiene un impacto mínimo en la temperatura de salida del aire, lo que resulta poco

conveniente económicamente. Los valores usuales para la longitud de los conductos oscilan entre los 10 y los 100 metros [2].

Es más eficiente un conjunto de tubos más cortos que una menor cantidad de tubos de mayor longitud. El espaciado entre tubos debe ser aquel que garantice la independencia térmica de los conductos.

- **Diámetro de los tubos:** Los diámetros pequeños son preferibles desde el punto de vista térmico ya que el flujo de transferencia de calor es mayor, pero presentan mayores pérdidas por fricción para una misma velocidad de flujo. Por lo tanto, es adecuado realizar un balance entre la transferencia de calor y el soplado de aire en los conductos. Los diámetros recomendados oscilan entre 20 y 60 cm [2], pudiendo llegar a valores superiores a un metro en edificaciones de gran envergadura.
- **Número de conductos:** El número de conductos a instalar depende de la sección de cada tubo, de la velocidad del aire y del caudal requerido. El caudal está determinado por el RITE [3] en la Tabla 1, en función del uso del edificio o local y la categoría de calidad del aire interior (IDA) mínima que se debe alcanzar.

Categoría	dm ³ /s por persona
IDA 1	20
IDA 2	12,5
IDA 3	8
IDA 4	5

Tabla 1: Caudales de aire exterior [dm³/s] por persona. Fuente: RITE [3].

Las categorías de IDA son:

IDA 1 (aire de óptima calidad): hospitales, clínicas, laboratorios y guarderías.

IDA 2 (aire de buena calidad): oficinas, residencias, salas de lectura, museos, salas de tribunales, aulas de enseñanza y piscinas.

IDA 3 (aire de calidad media): edificios comerciales, cines, teatros, salones de actos, habitaciones de hoteles, restaurantes, bares, gimnasios, salas de ordenadores.

IDA 4 (aire de calidad baja).

Cuanto mayor es la velocidad más caudal se impulsa, pero menor es el intercambio de calor, por lo que hay que buscar un valor intermedio para satisfacer ambas condiciones. Los valores recomendados de velocidad son entre 2 y 3 m/s.

- **Profundidad:** Se observan mayores rendimientos a medida que se aumenta la profundidad a la que se ubican los tubos. Se consideran valores típicos de profundidad comprendidos entre 1.5 y 3 metros.
- **Disposición de los tubos:** Las instalaciones de pozos canadienses requieren de grandes superficies de terreno y pueden situarse debajo o en las inmediaciones del edificio, depende de la cantidad de superficie disponible. Existen dos tipologías, en anillo o longitudinal. La disposición en anillo se trata de un único conducto que rodea el edificio y está recomendado en viviendas unifamiliares o edificios de pequeñas dimensiones. La disposición longitudinal o Tichelmann se trata de un número elevado de conductos, que pueden colocarse en paralelo o en múltiples alturas formando hileras de tubos, y se usan en edificios de gran tamaño.

- **Tipo de suelo:** La conductividad térmica del suelo es el factor principal a tener en cuenta en el diseño de un intercambiador, ya que determina las dimensiones del mismo. La conductividad térmica depende de la porosidad y el grado de saturación. Las rocas con elevada porosidad tienen valores más bajos de conductividad térmica. Los suelos húmedos son preferibles a los suelos secos debido a la gran conductividad térmica del agua, si bien un excesivo grado de humedad puede resultar desfavorable. Tanto los terrenos turbosos como los suelos arenosos secos deben ser evitados. Algunos expertos sugieren rodear los conductos con arcilla compactada para garantizar un adecuado contacto térmico entre los tubos y el terreno.

Para clasificar el terreno según esta propiedad se deben identificar los diferentes tipos de suelo y roca presentes en la zona, así como las variaciones en las propiedades físicas relevantes desde el punto de vista térmico.

2.5 Ventajas de los pozos canadienses

- Menor inversión en comparación con un sistema de climatización reversible convencional. Además, si se instalan durante la construcción del edificio, los costos se reducen aún más.
- Su funcionamiento requiere muy poca energía, limitando el gasto al consumo del extractor de aire cuando dispone de él.
- Mantenimiento reducido, que se limita a la limpieza de los tubos, el cambio de filtros y la purga del depósito de condensado cada cierto tiempo, junto con un mínimo mantenimiento del sistema de impulsión de aire.
- Es un sistema natural y ecológico, ya que utiliza un recurso local, abundante y completamente natural.
- Promueve la salud de las personas que se encuentran en el interior del edificio al mantener una adecuada renovación de aire y un nivel de humedad saludable.

2.6 Edificios con pozos canadienses

El uso de los pozos canadienses en acondicionamiento térmico de edificios se ha extendido en los últimos años. A continuación, se enumeran una serie de edificios distribuidos por España que han incorporado pozos canadienses en su diseño:

- Edificio Media-TIC en Barcelona
- Complejo Ciudad de la Justicia en Barcelona
- Edificio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura en Madrid
- Edificio Vodafone Plaza en Madrid
- Edificio Zero CO₂ en Valencia
- Edificio de la Fundación La Laboral en Gijón
- Edificio de la Delegación de Hacienda en Málaga
- Edificio de la Consejería de Medio Ambiente en Sevilla
- Edificio de oficinas en el Parque Tecnológico de Boecillo, Valladolid

En el presente trabajo, se va a particularizar para la zona de Aragón, que cuenta con los siguientes edificios con pozos canadienses:

- Edificio CIEM (Centro de Incubación Empresarial Milla Digital), Zaragoza
- Facultad de Filosofía y Letras, Zaragoza
- Centro de Salud de Barbastro
- Unidad de Urgencias del Hospital San Jorge, Huesca

3 EDIFICIOS ARAGÓN

En el presente apartado, se van a comentar brevemente cuatro edificios ubicados en Aragón a los que se les han instalado sistemas de pozos canadienses. Dos se encuentran en Zaragoza y otros dos en Huesca, siendo uno de los últimos al que se le va a realizar un análisis de datos.

3.1 CIEM, Zaragoza

El CIEM (Centro de Incubación Empresarial Milla Digital) es un edificio que alberga un vivero de empresas y se ubica en el entorno de la Estación Intermodal Delicias, dentro de un parque que forma parte del proyecto urbanístico de la futura Milla Digital de Zaragoza.

La edificación ocupa una parcela de 3.004 m², de la cual el 23 % corresponde al edificio propiamente dicho, mientras que el resto del espacio se destina a un intercambiador tierra-aire y aerogeneradores. En términos volumétricos, el edificio presenta un volumen total de 11.700 m³, con una superficie construida de 2.727 m² y una superficie útil de 2.309 m².

Se trata de un Edificio de Energía Casi Nula (EECM), ya que tiene una eficiencia energética elevada y la energía requerida está cubierta en gran medida por energía procedente de fuentes renovables.

El edificio presenta un diseño bioclimático para minimizar su demanda energética. Su orientación y ubicación están cuidadosamente seleccionadas para optimizar el aprovechamiento de los recursos naturales. Con una forma cúbica de 22 metros de lado, la estructura cuenta con un atrio central que permite la entrada de luz natural al interior. Además, dispone de una envolvente exterior que forma una cámara de aire de 0,8 m de ancho, abierta en su parte superior e inferior y regulada por compuertas automatizadas, lo que facilita la circulación natural del aire.

El sistema de climatización es del tipo “100 % aire exterior”, con difusión de aire por desplazamiento, garantizando una calidad del aire y una renovación muy por encima de los estándares establecidos en el RITE [3].

Prácticamente toda la energía primaria necesaria para los sistemas de climatización, ventilación e iluminación se genera in situ mediante tres aerogeneradores situados en el exterior y paneles fotovoltaicos integrados en la fachada sur y la cubierta del edificio. El aire extraído se dirige a las cámaras de fachada después de pasar por un recuperador rotativo entálpico instalado en la unidad de tratamiento de aire (UTA).

La UTA incorpora una bomba de calor geotérmica que utiliza la energía del nivel freático. El aire del exterior llega pretratado por el intercambiador tierra-aire y, cuando este no alcanza la temperatura deseada, una caldera de biodiésel de baja temperatura entra en funcionamiento para complementar el sistema. Este intercambiador está formado por 18 tubos de hormigón de 50 metros de longitud, dispuestos en dos hileras a tresbolillo a una profundidad de entre 4 y 6 metros y separados 0,6 m entre sí.

Cada tubo, con un diámetro interior de 300 mm y un espesor de 10 mm, tiene un coeficiente de transmisión térmica de 0,93 W/m²K. El sistema EAHX trata el 100 % del aire empleado en la climatización, impulsado por el ventilador de la UTA, que genera un efecto de succión para mover el aire a través del conducto. El recorrido del aire es de 60 metros desde el punto de admisión hasta la climatización del edificio, de los cuales 50 metros corresponden al sistema EAHX.

El diseño incluye colectores transitables de hormigón armado en ambos extremos de los conductos, que permiten la inspección y el mantenimiento. Estos colectores también facilitan la evacuación de posibles condensaciones o agua utilizada en la limpieza periódica de los tubos, gracias a una pendiente del 1 % hacia el colector de entrada de aire.

Por último, el sistema cuenta con sensores en la entrada y salida del intercambiador, que registran en intervalos de 15 minutos variables como la temperatura, la humedad y el caudal de aire. Estos datos permiten un control preciso del rendimiento del sistema.

3.2 Facultad de Filosofía y Letras, Zaragoza

El proyecto de la Facultad de Filosofía y Letras de Zaragoza comprende la nueva construcción de un edificio departamental y la reforma integral de un edificio existente. Se han implementado diversas medidas de eficiencia energética para minimizar la huella ambiental y lograr la certificación de Edificio de Energía Casi Nula, en línea con la Directiva 2010/31.

En cuanto al sistema de climatización, se ha optado por un diseño de producción centralizada de energía que incluye los siguientes componentes:

- Bomba de calor condensada por agua de pozo, que actúa como el sistema principal.
- Aerotermia mediante una bomba de calor aire-agua de alta eficiencia.
- Sistema de cogeneración solar mediante paneles híbridos (térmicos y fotovoltaicos) combinados con una acumulación estacional de energía.
- Equipo de adsorción para la producción de energía térmica frigorífica, que utiliza como fuente de energía las placas solares térmicas, y como sumidero de energía el agua de pozo.

La combinación de estos sistemas asegura la utilización de la fuente de producción más eficiente en función de las condiciones exteriores y la ocupación del edificio. Este enfoque permite un balance energético casi nulo y minimiza el consumo en los sistemas de calefacción y refrigeración.

Con respecto a la ventilación del edificio, se han integrado intercambiadores tierra-aire para atemperar el aire primario de ventilación. Teniendo en cuenta el gran volumen de aire primario requerido debido a la ocupación del edificio, y que en Zaragoza las condiciones climáticas son extremas, especialmente en invierno, esta medida supone un gran ahorro energético.

Se diferencian dos sistemas principales de ventilación. Para las estancias generales del edificio nuevo administrativo, como el aula magna, los climatizadores toman el aire exterior tratado en los pozos canadienses, que se introduce mediante compuertas. Mientras que, en el edificio de docencia rehabilitado, el aire primario tratado en los pozos se distribuye a través de patinillos verticales ubicados bajo cubierta y llega a las aulas mediante recuperadores conectados a los equipos de aire limpio.

El sistema de pozos canadienses se ha previsto como captación del aire primario para ventilar, sin embargo, este aire también se utiliza para ventilación nocturna en verano y para refrigerar la doble piel del edificio, generando un flujo convectivo hacia la parte superior, funcionando como una chimenea solar.

Este intercambiador está formado por 28 tubos dispuestos en cuatro hiladas a tresbolillo a una profundidad entre 4 y 8 metros, como se muestra en la Figura 3. Estos tienen una

longitud de 40 metros y un diámetro de 30 centímetros. Además, se han utilizado tres tipos de materiales para los tubos (hormigón, polietileno corrugado y PVC), y se monitorizarán las temperaturas de cada material para evaluar su rendimiento.

Para optimizar la ventilación en áreas con ocupación variable (como salas de lectura, exposiciones y seminarios), se han diseñado sistemas de distribución de aire primario a caudal variable. Los climatizadores de aire primario tienen los ventiladores con variadores de frecuencia que ajustan el caudal del aire según las necesidades, reduciendo el consumo energético. Además, se utilizan sondas de calidad ambiental para regular las compuertas motorizadas que habilitan únicamente las zonas de uso.



Figura 3: Tubos del intercambiador tierra-aire de la Facultad de Filosofía y Letras de Zaragoza.

3.3 Centro de Salud de Barbastro

El proyecto del Centro de Salud de Barbastro, en la provincia de Huesca, contempla un edificio de nueva construcción y la rehabilitación integral de un edificio existente. Ambas construcciones están interconectadas y dotadas de una instalación centralizada de climatización, diseñada para garantizar la eficiencia energética y cumplir con los estándares de Edificio de Energía Casi Nulo

El sistema centralizado de climatización se basa en las siguientes soluciones:

- Aerotermia de alto rendimiento: Dos bombas de calor aire-agua, que funcionan como sistema principal para la producción de frío y como sistema secundario para calor. Estas bombas modulares permiten operar en frío o calor simultáneamente en cualquier época del año.
- Sistema de cogeneración solar mediante 120 paneles solares híbridos (térmicos y fotovoltaicos), combinado con acumulación estacional de energía en un depósito de 58 m³ para el almacenamiento de calor, como sistema principal de calor.
- Sistema híbrido de adsorción-compresión, siendo este el sistema secundario para la producción de frío, teniendo prioridad absoluta sobre las bombas de calor por

motivos de eficiencia energética. Este equipo aprovecha el calor generado por los paneles térmicos y la electricidad producida por los paneles híbridos.

Estos sistemas combinados garantizan un alto rendimiento y un bajo consumo energético, teniendo en cuenta tanto las demandas actuales como los costes futuros de mantenimiento.

En términos de ventilación, se usa un sistema de pozos canadienses para preacondicionar el aire primario de la zona de urgencias, ya que opera las 24 horas del día de forma continua y requiere una elevada cantidad de aire primario, suponiendo su tratamiento un gran gasto. El intercambiador tierra-aire se compone de 18 tubos dispuestos en tres hiladas a 4 metros de profundidad. Estos tienen una longitud de 25 metros y un diámetro de 30 centímetros.

El proyecto incluye tres climatizadores principales, que cubren tanto el edificio nuevo como el rehabilitado. El edificio nuevo tiene dos climatizadores de tratamiento que aportan el aire primario tratado, uno de ellos dedicado únicamente a la planta de urgencias y que recibe el aire de los pozos canadienses, y el otro para el resto del edificio. Por otra parte, el edificio rehabilitado, tiene otro climatizador de ventilación, diseñado para trabajar en combinación con fancoils de conductos a cuatro tubos, que cubre todo el edificio. En el edificio nuevo, además de los climatizadores, se ha incluido un sistema de suelo radiante para las zonas comunes y cajas de volumen variable con baterías de postcalentamiento en áreas de alta ocupación.

La distribución de agua y aire de climatización se ha diseñado para optimizar el consumo energético ajustándolo a la demanda real en cada momento. Los circuitos de agua se han equipado bombas de caudal variable y válvulas motorizadas de dos vías para cada equipo zonal, lo que permite reducir significativamente el consumo eléctrico al adaptar el flujo de agua a las necesidades instantáneas del edificio. Los sistemas de ventilación emplean sondas de calidad ambiental y compuertas motorizadas que regulan automáticamente la entrada de aire, suministrando únicamente el aire necesario en cada momento. Además, los ventiladores de los climatizadores están equipados con variadores de frecuencia, permitiendo una regulación precisa del caudal en función de las áreas en uso.

3.4 Hospital San Jorge, Huesca

El Hospital San Jorge situado en Huesca es el edificio objeto de estudio del presente Trabajo de Fin de Máster. Las obras de reforma realizadas en la Unidad de Urgencias del Hospital San Jorge situado en Huesca se tratan básicamente de una ampliación, ya que se edificó en un área en la que no había ninguna construcción. La nueva Unidad de Urgencias se sitúa al lado de las antiguas Urgencias, ocupando parte del aparcamiento, como se ve en la Figura 4.



Figura 4: Situación de la nueva Unidad de Urgencias del Hospital San Jorge, Huesca.

Todos los servicios de suministros de instalaciones (agua, saneamiento, electricidad y gases medicinales) se conectan a los ya existentes del Hospital. Existe una galería que cuenta con todos los suministros necesarios para las necesidades del proyecto. A continuación, se va a centrar este apartado en explicar los sistemas de climatización y ventilación de la nueva construcción.

Anteriormente, la energía se producía en la central térmica del hospital ubicada en un edificio industrial independiente. Para la ampliación se ha creado una nueva subcentral térmica en el anillo hidráulico existente del hospital, destinada a alimentar diversos servicios nuevos del complejo hospitalario. En la subcentral térmica se han instalado dos intercambiadores de placas de alto rendimiento, uno dedicado a la transferencia de calor y otro a la de frío. A partir de estos equipos saldrán las nuevas redes de distribución de calor y frío, dos circuitos hidráulicos independientes.

En esta obra, no se han aplicado sistemas de producción de energía renovables debido a que es una actuación parcial en un edificio existente y se ha actuado directamente sobre la central de producción de energía del hospital.

Se han planteado sistemas de climatización con temperaturas de trabajo acordes a lo existente en los anillos hidráulicos del hospital. Dichas temperaturas son las siguientes:

- Temperatura de impulsión / retorno en calor: 80°C / 65°C
- Temperatura de impulsión / retorno en frío: 9°C / 15°C

Los sistemas terminales de tratamiento de energía instalados son fancoils y climatizadores, además de sistemas de expansión directa para los cuartos que alojan los RACKS secundarios y cuadros eléctricos generales del servicio donde se han proyectado fancoils para frío. Estos sistemas están regulados mediante una gestión centralizada para el control de todos los equipos de climatización del nuevo edificio, integrado en el sistema de control general del hospital.

Para las zonas diáfanas o de características especiales, hay instalados 7 climatizadores de tratamiento, los cuales integran la renovación de aire exigida. Estos utilizan un sistema de recuperación de energía por flujos cruzados, y por baterías para evitar el contacto entre los flujos de impulsión y extracción en el aire primario.

En el resto de espacios, se climatiza mediante fancoils a 4 tubos y se cubren las necesidades de ventilación mediante 3 climatizadores de aporte de aire primario. Todos

ellos con recuperación de energía y baterías de calor y frío. Estos son independientes entre ellos y dan a 3 zonas diferentes, siendo sectorizados para dar versatilidad.

Todo el aire exterior que entra a los climatizadores proviene del sistema de pozos canadienses. Este aire discurre a través de 32 tubos dispuestos en 2 hiladas a una profundidad de entre 3,5 y 6 metros. Los tubos tienen 75,4 metros de longitud, un diámetro de 31,5 centímetros con un espesor de 7,7 mm, y están hechos de PVC.



Figura 5: Construcción del pozo canadiense del Hospital San Jorge (Huesca).



Figura 6: Construcción del pozo canadiense del Hospital San Jorge (Huesca).

3.5 Comparativa

Los pozos canadienses no solo se utilizan en edificios de energía casi nula, sino que se instalan también en otros casos en los que no se aplican energías renovables, como en la ampliación del Hospital de Huesca. En los ejemplos anteriores se ve la tendencia a ser utilizados en grandes edificios en los que es necesario un elevado volumen de aire primario, por lo que la instalación de este tipo de sistema supone un ahorro en el consumo energético. Si bien es cierto, inicialmente la instalación es más costosa. Además, en edificios como hospitales en los que es necesario una mayor renovación de aire todavía son más provechosos este tipo de sistemas.

En la Tabla 2 se han recopilado los datos de las dimensiones de los pozos canadienses de los cuatro edificios comentados anteriormente. Como se puede observar, el diámetro de todos los tubos es de 30 cm, aproximadamente, y la profundidad se encuentra entre los 4 y los 6 metros. Los cuatro edificios se sitúan en las provincias de Zaragoza y Huesca, donde las condiciones meteorológicas son extremas y las temperaturas del subsuelo para el intercambio de calor son muy similares entre ellos. Sin embargo, la longitud varía bastante en función de cada caso, desde los 25 a los 75 metros, dimensión que también depende del terreno disponible para instalar los tubos. En cuanto al número de tubos y su distribución, depende de las necesidades de aire primario del edificio y, nuevamente, del terreno disponible, por lo que en cada caso es diferente.

	CIEM	Facultad de Filosofía y Letras de Zaragoza	Hospital de Barbastro	Hospital de Huesca
Diámetro (cm)	30	30	30	31,5 + 7,7 e
Longitud (m)	50	40	25	75,4
Nº de tubos	18	28	18	32
Nº de filas	2	4	3	2
Profundidad (m)	4 - 6	4 – 8	4 - 6	3,5 - 6
Material	Hormigón	Hormigón, polietileno reticulado, PVC	-	PVC

*Tabla 2: Resumen de las características de los pozos canadienses de varios edificios de Aragón.
Fuente: Elaboración propia.*

4 HOSPITAL DE HUESCA

Este apartado se va a centrar en el sistema de pozos canadienses de la nueva unidad de Urgencias del Hospital San Jorge de Huesca, comentado en el punto 3.4.

4.1 Condiciones del terreno

Como se ha comentado en el apartado 2.1, la estabilidad térmica aumenta progresivamente con la profundidad hasta los 10 o 15 metros, donde se vuelve constante. En un clima extremo como el de Huesca la instalación de pozos canadienses es de gran provecho debido a la gran inercia térmica del suelo, tanto diaria como estacional.

La temperatura del terreno en función de la profundidad y del momento temporal se estima con la Ecuación (1), propuesta por la Guía 14 del IDAE [4].

$$T(z, t) = T_m - A_s e^{-\frac{z}{\sqrt{365\alpha}}} \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right] \quad (1)$$

Donde:

$T(z, t)$ es la temperatura del suelo a una profundidad y momento del año determinados [°C]

z es la profundidad [m]

t es el momento del año [días]

T_m es la temperatura media anual del suelo a una profundidad en la que no son perceptibles las variaciones de temperatura [°C]

A_s es la oscilación de la temperatura superficial [°C]

t_0 es el desfase [días]

α es la difusividad térmica del suelo [m²/día]

La temperatura media del terreno y la oscilación anual dependen de la localización, así que se han obtenido los valores de la Guía 12 del IDAE [5], cuyos datos vienen de la estación meteorológica de Monflorite (Huesca)

$$T_m = 13,78 \text{ } ^\circ\text{C} \quad A_s = 9,62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El desfase se refiere al desplazamiento de la temperatura superficial con la profundidad y un valor típico de este parámetro según el análisis de Kusuda es $t_0 = 35 \pm 10$ días.

La difusividad térmica depende del tipo de terreno y del contenido de agua, y se define en la Ecuación (2) como:

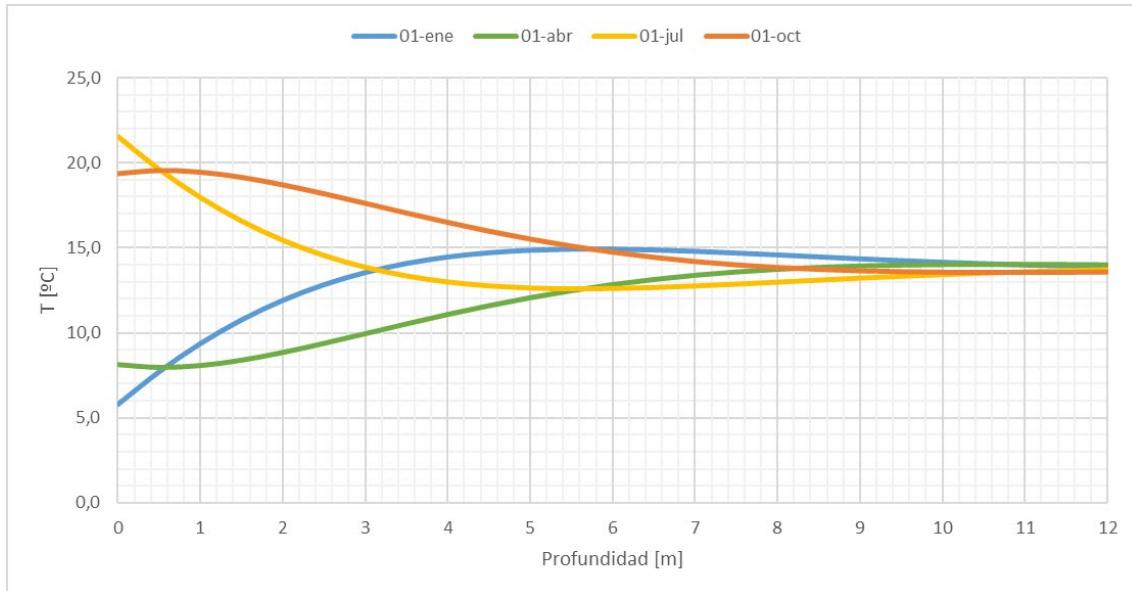
$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2)$$

Siendo k la conductividad térmica, ρ la densidad y c_p el calor específico.

El IGME [6] indica que el tipo de roca que más abunda es la arenisca, y la Guía 14 del IDAE propone unos valores orientativos, por lo que:

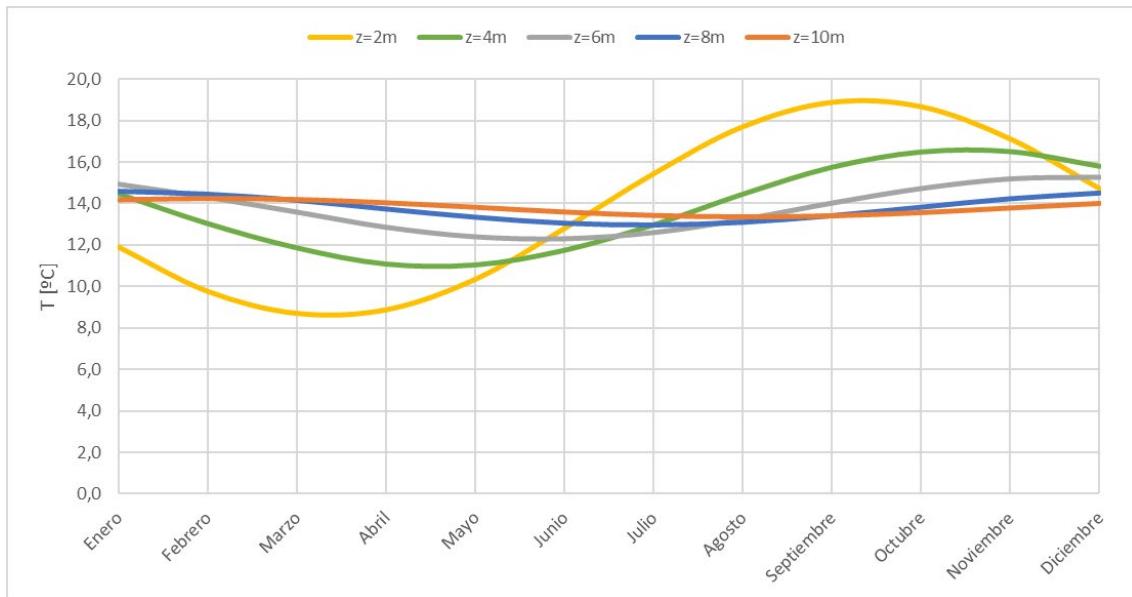
$$\alpha = \frac{2,3 \text{ W/mK}}{2,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

A partir de los datos anteriores, se ha representado en la Gráfica 1 la variación de la temperatura con la profundidad y, como se puede observar, se estabiliza a unos 14°C a partir de los 10 metros.



Gráfica 1: Temperatura del terreno en función de la profundidad para cada estación del año.
Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 2 se ha representado el comportamiento térmico del terreno a lo largo del año para diferentes profundidades. La variación estacional de la temperatura del suelo sigue una aproximación sinusoidal, donde la amplitud disminuye con el incremento de la profundidad. Además, el momento en que se alcanzan las temperaturas máxima y mínima se desfase en el tiempo, ya que se produce un retraso en la propagación de la onda térmica a medida que penetra en el suelo. La temperatura máxima se da en el mes de septiembre y la mínima en marzo.



Gráfica 2: Temperatura del terreno a lo largo del año para cada diferentes profundidades.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Análisis de datos

En este sistema se colocaron una serie de sondas que recopilan datos cada 15 minutos desde que el pozo se puso en funcionamiento. En los puntos de entrada, medio, salida y producción se toman la temperatura y la humedad relativa del aire, mientras que en el exterior únicamente se recoge la temperatura. Además, también se obtiene la presión estática del pozo en el punto de producción. En la Figura 7 se muestra de forma esquemática como están ubicados dichos puntos.

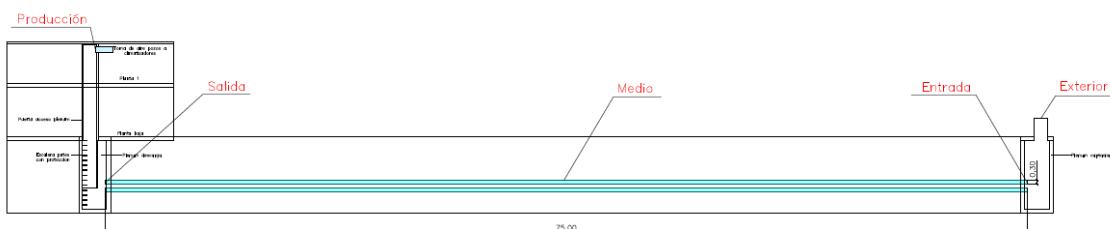


Figura 7: Esquema pozo canadiense. Fuente: Elaboración propia.

A lo largo del análisis, se hace mención a dos bancos de tubos, el primer banco de tubos se refiere a los tubos propiamente dichos del intercambiador, y el segundo banco de tubos es el tubo grande que conecta el primer banco de tubos con la aspiración del ventilador, es decir, el tramo desde el punto de salida al punto de producción.

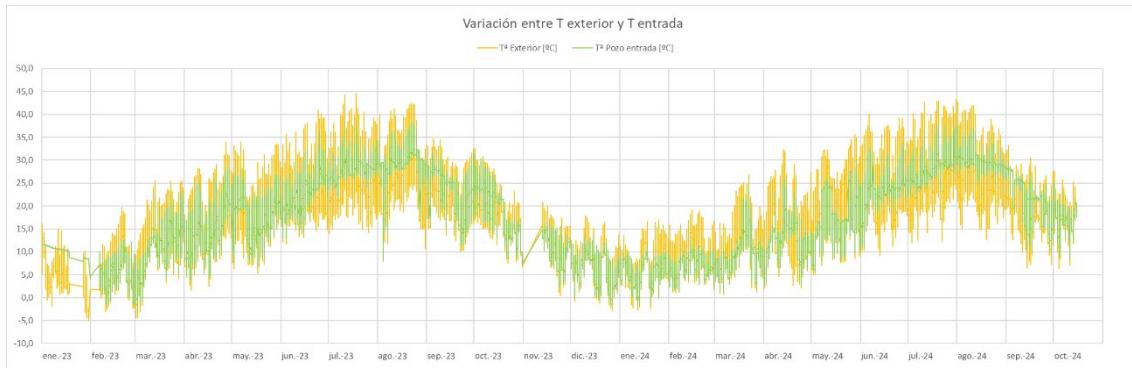
Los datos que se van a analizar abarcan desde el 01/01/2023 0:00 al 15/10/2024 9:30. Sin embargo, existen dos períodos en los que no se recogieron datos, debido a un problema con las sondas y la recopilación de los datos, por lo que los siguientes períodos se han eliminado del análisis:

- 31/01/2023 11:30 - 06/02/2023 8:45
- 31/10/2023 6:30 - 13/11/2024 10:30.

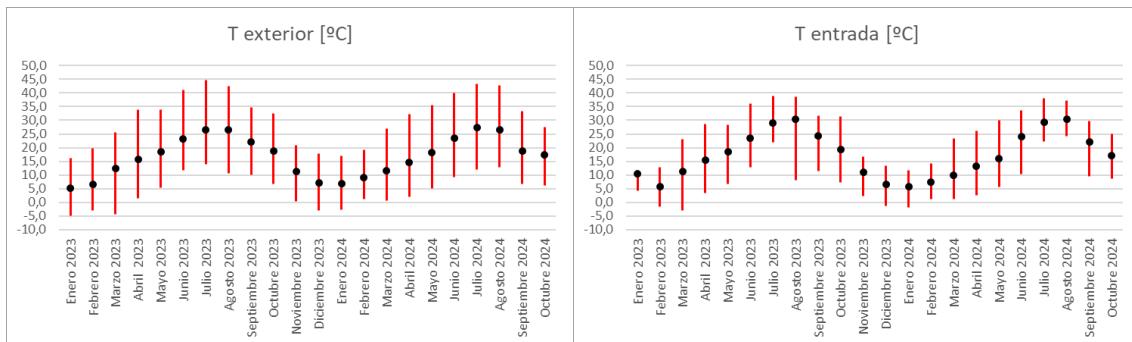
Inicialmente, se van a analizar todos los datos en conjunto.

4.2.1 Temperaturas

En la Gráfica 3 se representan la temperatura exterior (línea naranja) y la temperatura de entrada a los tubos (línea verde), la cual varía de forma considerable respecto a la primera. Además, como se observa en la Gráfica 4, la temperatura exterior presenta variaciones drásticas diariamente, lo que se debe a una colocación errónea de la sonda en el exterior. Factores como el sol o el viento influyen directamente en la sonda elevando o disminuyendo, respectivamente, la temperatura que recopila.

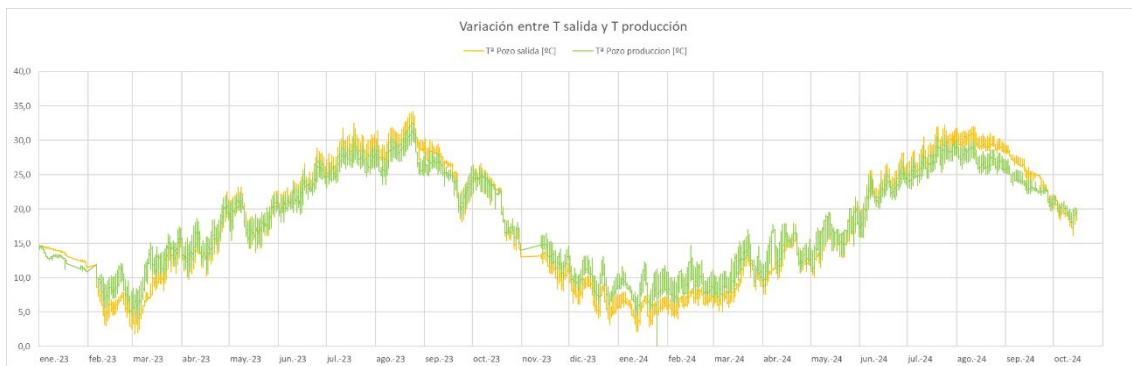


*Gráfica 3: Variación de la temperatura exterior y la temperatura de entrada. Ver ANEXO I.
Fuente: Elaboración propia.*



Gráfica 4: Diagrama con los valores mínimo, máximo y medio de la temperatura exterior (izquierda) y la temperatura de entrada (derecha) en cada mes. Fuente: Elaboración propia.

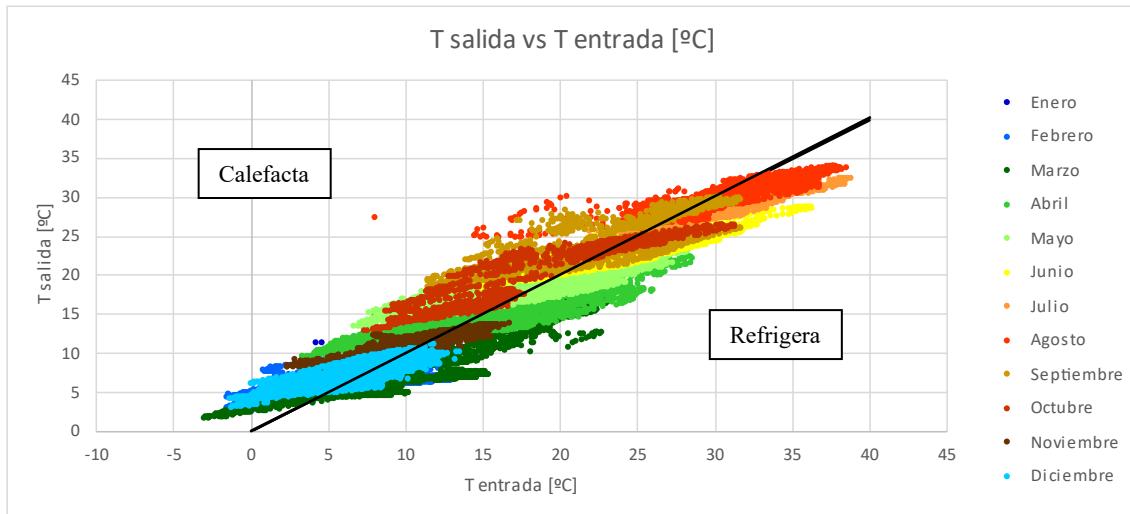
Además, también se ha comparado en la Gráfica 5 la temperatura de producción (línea verde) frente a la temperatura de salida de los tubos (línea naranja).



*Gráfica 5: Variación de la temperatura de salida y temperatura de producción. Ver ANEXO I.
Fuente: Elaboración propia.*

Se observa como en el segundo banco de tubos el pozo sigue aportando energía. En los períodos de calefacción la temperatura del aire de producción continúa aumentando frente a la de salida, mientras que en los períodos de refrigeración la temperatura del aire de producción disminuye más respecto a la de salida de los tubos.

En la Gráfica 6 se representa mediante una nube de puntos la relación entre la temperatura de entrada y la de salida de los tubos en cada mes de 2023. La gráfica se divide en dos regiones por una línea diagonal que representa los puntos en los que no existe intercambio de calor cuando la temperatura de entrada es igual a la de salida. En la parte superior de la línea el aire coge calor del terreno y en la parte inferior lo cede.



Gráfica 6: Relación entre la temperatura de salida y de entrada a los tubos en cada mes de 2023. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Potencia térmica

Se ha calculado la potencia térmica aportada por el pozo en cada instante mediante la siguiente fórmula:

$$P = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{prod} - T_{ent}) \quad (3)$$

Siendo \dot{m} el flujo másico de aire, c_p el calor específico del aire, T_{prod} la temperatura de producción y T_{ent} la temperatura de entrada al pozo.

Para calcular la potencia se ha considerado la temperatura de entrada en lugar de la temperatura exterior, debido a lo comentado en el apartado anterior 4.2.1. La temperatura de entrada siempre se mide en las mismas condiciones, mientras que la sonda de la temperatura exterior se ve afectada por más factores, lo que puede dar lugar a resultados incorrectos.

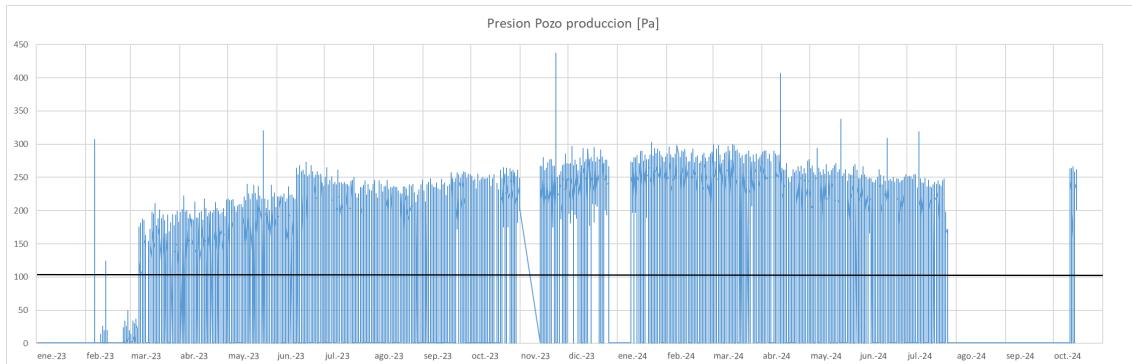
El flujo másico se obtiene a partir del caudal del ventilador. El ventilador instalado es el modelo CDXRT-630-7.5 IE3 de la marca Sodeca. Este no tiene variador de frecuencia, sin embargo, el caudal en cada instante puede variar dentro de un rango. Esto se debe a variaciones en la densidad del aire (debido a cambios en la temperatura y la humedad relativa), a obstrucciones de polvo y partículas, a pérdidas de carga variables o a cambios en la presión ambiente. Por ello, se ha calculado el caudal instantáneo del ventilador con la Ecuación (4):

$$V = S \sqrt{\frac{2}{\rho} \sqrt{\Delta P}} \quad (4)$$

Siendo V el caudal de aire, S la sección efectiva del oído del ventilador, ρ la densidad del aire y P la presión.

Las propiedades del aire, tanto la densidad como el calor específico, no se han considerado constantes, sino que se han calculado en cada instante ya que varían ligeramente en función de la temperatura y la humedad.

Además, según indican la ficha técnica y la curva de funcionamiento del ventilador, el caudal máximo es de $29900 \text{ m}^3/\text{h}$ y la presión estática en esas condiciones es de 100 Pa. Por ello se va a considerar que el pozo está en funcionamiento cuando la presión del pozo de producción es mayor o igual a 100 Pa. En la Gráfica 7 se representan los valores de presión recopilados en el punto de producción, y una línea negra en 100 Pa que indica que parte del tiempo el ventilador está funcionando.

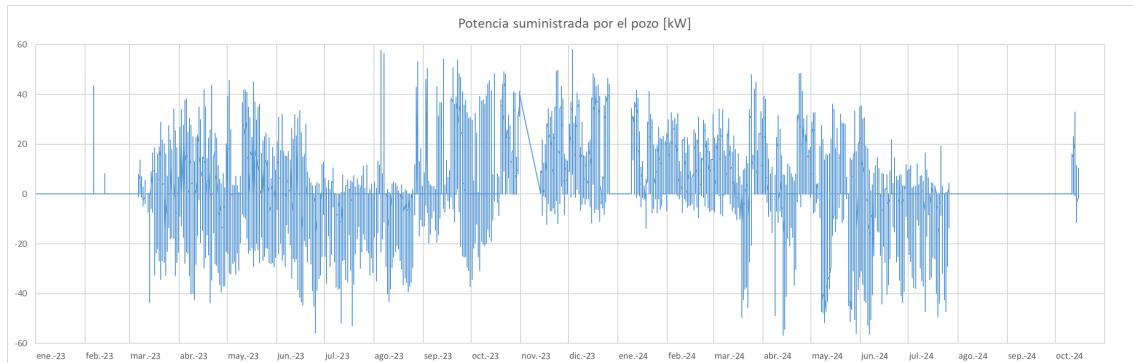


Gráfica 7: Presión pozo de producción [Pa]. Ver ANEXO I. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, existen varios períodos en los que la presión medida es nula, y se van a describir a continuación:

1. 01/01/2023 00:00 - 06/03/2023 20:00: Se trata del momento de puesta en marcha del pozo canadiense. Se divide en dos períodos diferenciados, ya que del 31 de enero al 6 de febrero no existe registro de datos.
 - 1.1. En la primera parte, hasta el 31 de enero a las 11:15, las humedades relativas tomadas son muy elevadas, rozando el 100% en el punto de producción, se producen variaciones muy bruscas entre la temperatura exterior y la de entrada, y todos los registros de presión de la sonda son de 1 Pa. Esto indica que la puesta en marcha del pozo canadiense no se ha realizado el 1 de enero, sino que se han comenzado a recopilar datos sin estar en funcionamiento.
 - 1.2. En la segunda parte, del 6 de febrero a las 9:00 hasta el 6 de marzo a las 20:00, todos los registros de presión de la sonda son de 1 Pa salvo en momentos puntuales en los que llega como máximo a 40 Pa. Si la puesta en marcha se ha realizado ya, el ventilador debería estar en funcionamiento en gran parte de este periodo.
2. 26/12/2023 11:00 - 09/01/2024 11:30: Se realiza una parada del pozo para realizar el mantenimiento de las instalaciones.
3. 26/07/2024 0:30 - 11/10/2024 14:15: Se trata de un periodo en el que han dejado parado el ventilador. Se desconoce el motivo.

Por otra parte, en la Gráfica 8 se representa la potencia suministrada por el pozo, calculada con la Ecuación (3). Cuando esta es positiva significa que está calefactando, ya que la temperatura del aire ha aumentado en su recorrido por los tubos, mientras que cuando es negativa, está refrigerando, debido a que la temperatura del aire ha disminuido.



Gráfica 8: Potencia suministrada por el pozo [kW]. Ver ANEXO I. Fuente: Elaboración propia.

Para los próximos cálculos del análisis, se van a eliminar los datos obtenidos de las paradas comentadas en los puntos 1.1, 2 y 3. El punto 1.2 no, ya que parece estar funcionando, pero de forma errónea. A partir del punto 3 se han recogido datos de únicamente 4 días y tampoco se van a tener en cuenta.

4.2.3 Consumo eléctrico

Se ha calculado el consumo eléctrico del pozo en cada instante, siendo este el consumo del ventilador. En la Figura 8, a la izquierda se ve la chapa del motor del ventilador y a la derecha una medida tomada del mismo. En la ficha técnica y en la chapa del motor indica que consume 5,5 kW, sin embargo, al calcularlo con los datos de la chapa del motor mediante la Ecuación (5) de motor trifásico se obtienen 6,135 kW. Además, si se calcula con las medidas realizadas in situ es de 6,173 kW. Por ello se va a tomar un promedio de las dos últimas.

$$P = \sqrt{3}VI \cos \varphi \quad (5)$$

Es decir, cuando el ventilador está en marcha (cuando la presión del pozo de producción es mayor o igual a 100 Pa) el consumo es de 6,155 kW.

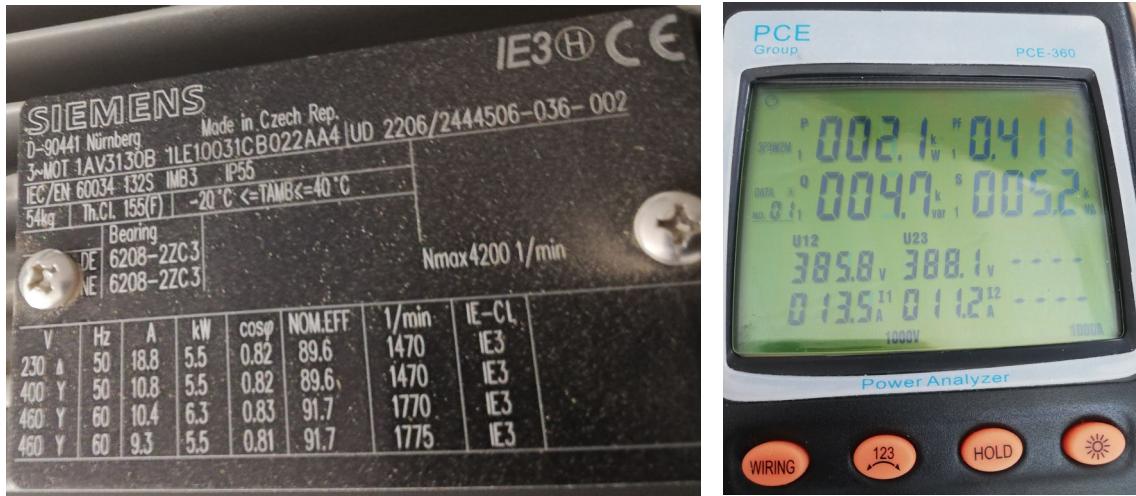
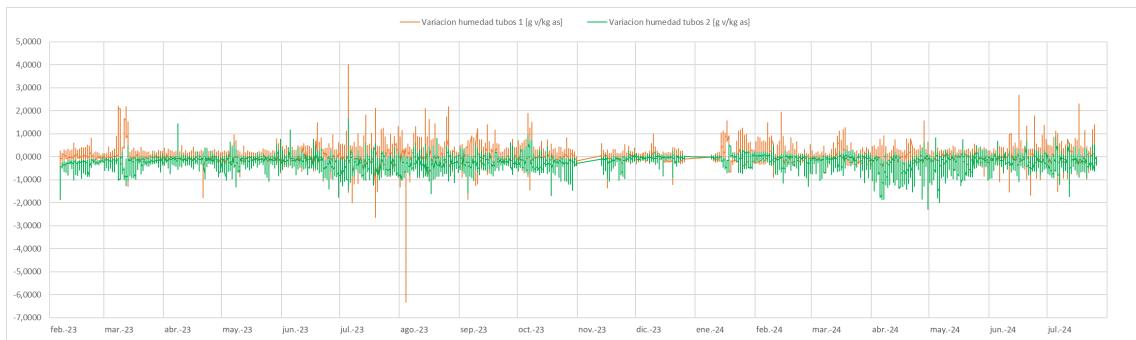


Figura 8: Chapa del motor (izquierda) y medidas realizadas al motor (derecha).

4.2.4 Condensación

Se ha estudiado la posible condensación del vapor de agua contenido en el aire tanto en el primer banco de tubos como en el segundo. A partir de las humedades relativas dadas se obtienen las humedades específicas para hallar la cantidad de agua por kilogramo de aire seco que condensa. Cuando la humedad del aire aumenta a lo largo del sistema no se produce condensación, sin embargo, cuando esta disminuye se debe a una reducción de vapor de agua en el aire por su condensación. En la Gráfica 9 se representa la variación entre la entrada y la salida de los dos bancos de tubos y, como se puede observar, la condensación se produce mayoritariamente en el primero (línea naranja), mientras que en el tubo grande (línea verde) también se produce, pero en menor cantidad.



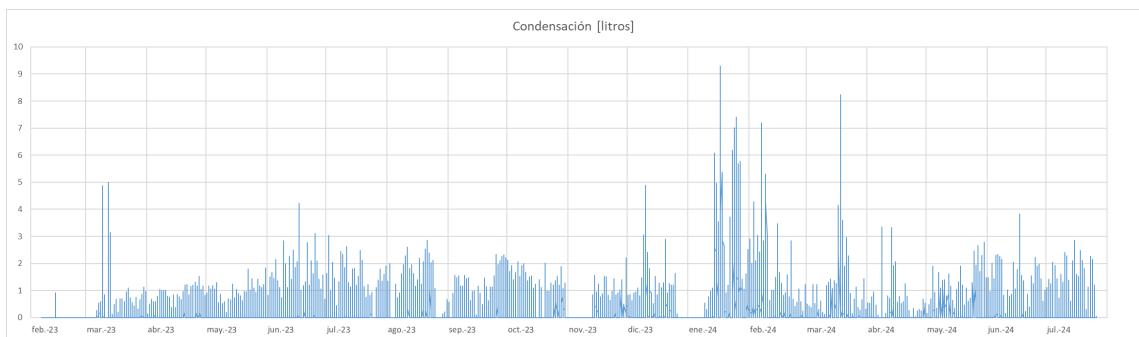
Gráfica 9: Variación de humedad específica a lo largo del primer y del segundo banco de tubos [g vapor/kg aire seco]. Ver ANEXO I. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3 se agrupan las veces que el aire ha perdido humedad en todo el sistema en conjunto. La mitad de los datos analizados indican que se produce condensación, mientras que en la otra mitad no. En el 98% de los casos que se produce condensación, esta es menor de 1 gramo de vapor de agua por kilo de aire.

Nº veces que no condensa	24378	50%
Nº veces que condensa	24131	50%
$\leq 1 \text{ g v/kg as}$	23616	97,87%
$1 \text{ g v/kg as} < \text{cond} \leq 2 \text{ g v /kg as}$	453	1,88%
$2 \text{ g v/kg as} < \text{cond} \leq 3 \text{ g v /kg as}$	59	0,24%
$> 3 \text{ g v/kg as}$	3	0,01%

Tabla 3: Porcentajes de condensación.

Tras calcular el volumen de agua condensada en función del caudal de aire que circula por el sistema en cada momento se obtiene como resultado que se han condensado 3418 litros de agua a lo largo de todo el año 2023 hasta la parada por mantenimiento el 26 de diciembre, y 3187,9 litros en 2024. En la Gráfica 10 se representa el volumen de agua condensada cada 15 minutos y en la Gráfica 11 el volumen total de agua recogido por mes. Enero de 2024 es el mes en el que mayor cantidad de agua ha condensado.



Gráfica 10: Litros condensados de agua en el sistema de pozos canadienses. Ver ANEXO I.
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 11: Litros condensados de agua por meses en el sistema de pozos canadienses. Ver ANEXO I. Fuente: Elaboración propia.

4.2.5 Funcionamiento

Se va a analizar el funcionamiento del pozo. Para ello, es necesario conocer el sistema de control que tiene implementado:

- En invierno el pozo se pone en marcha cuando la temperatura de producción está un grado por encima de la exterior, y se para cuando la temperatura de producción está un grado por debajo de la exterior.

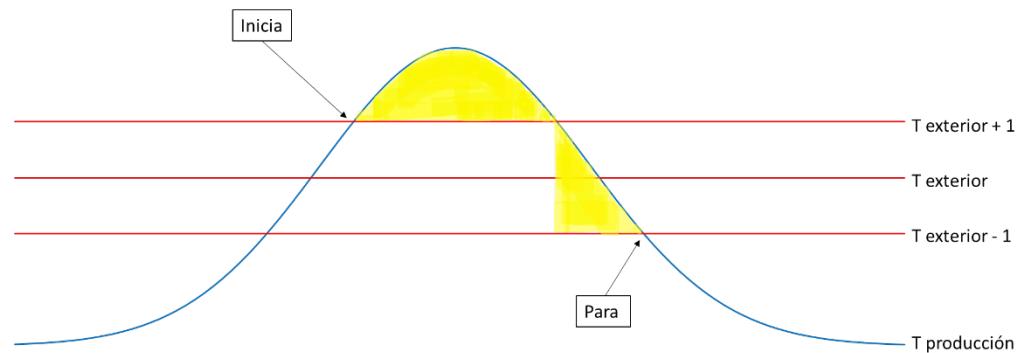


Figura 9: Esquema de funcionamiento del pozo en calefacción. Fuente: Elaboración propia.

- En verano el pozo se pone en marcha cuando la temperatura de producción está un grado por debajo de la exterior, y se para cuando la temperatura de producción está un grado por encima de la exterior.

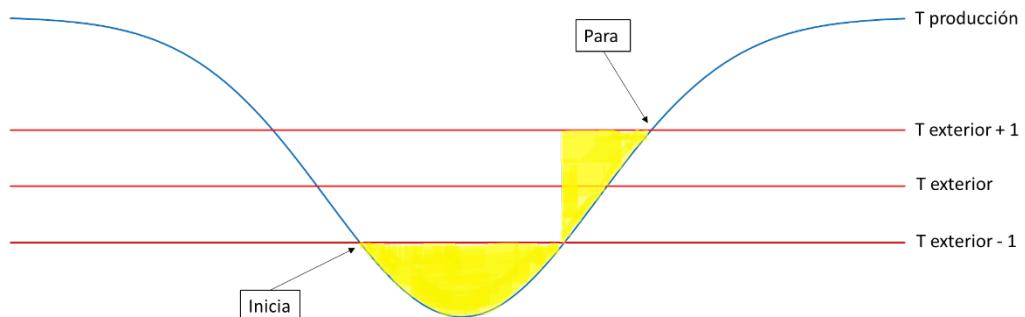


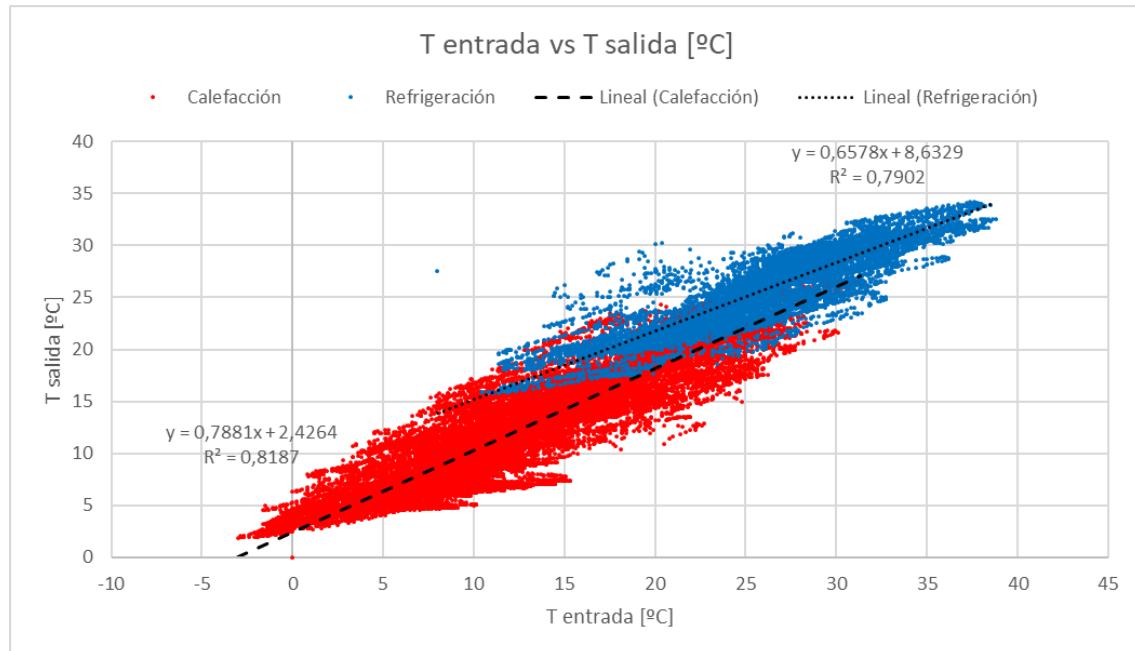
Figura 10: Esquema de funcionamiento del pozo en refrigeración. Fuente: Elaboración propia.

Para establecer si el funcionamiento del pozo en cada instante es correcto o incorrecto, es necesario definir varios puntos. En primer lugar, los períodos de calefacción y refrigeración, los cuales se han obtenido a partir de los datos de funcionamiento de las climatizadoras. Los modos de funcionamiento de estas aproximadamente son:

- En invierno la temperatura de consigna de 21°C y la temperatura del aire de impulsión de 27 a 35°C (siempre menor de 40°C).
- En verano la temperatura de consigna de 25°C y la temperatura del aire de impulsión de 14 a 15°C.

Por lo tanto, la refrigeración se produce en los meses de junio a septiembre, y la calefacción el resto del año.

En la Gráfica 12 se muestra la relación entre las temperaturas de entrada y salida a los tubos en ambos períodos y los valores de R^2 indican que la regresión lineal se ajusta bien a los datos reales.



*Gráfica 12: Relación entre la temperatura de salida y de entrada a los tubos en cada periodo.
Fuente: Elaboración propia.*

En segundo lugar, establecer los criterios de funcionamiento correcto e incorrecto.

Correcto:

- Calefacción, $T_{prod} \geq T_{text+1}$, ventilador encendido
- Calefacción, $T_{text+1} > T_{prod} \geq T_{text-1}$, ventilador encendido y en el momento anterior el ventilador también estaba encendido
- Calefacción, $T_{text+1} > T_{prod} \geq T_{text-1}$, ventilador parado y en el momento anterior el ventilador también estaba parado
- Calefacción, $T_{prod} < T_{text-1}$, ventilador parado
- Refrigeración, $T_{prod} \leq T_{text-1}$, ventilador encendido
- Refrigeración, $T_{text-1} < T_{prod} \leq T_{text+1}$, ventilador encendido y en el momento anterior el ventilador también estaba encendido
- Refrigeración, $T_{text-1} < T_{prod} \leq T_{text+1}$, ventilador parado y en el momento anterior el ventilador también estaba parado
- Refrigeración, $T_{prod} > T_{text+1}$, ventilador parado

Incorrecto:

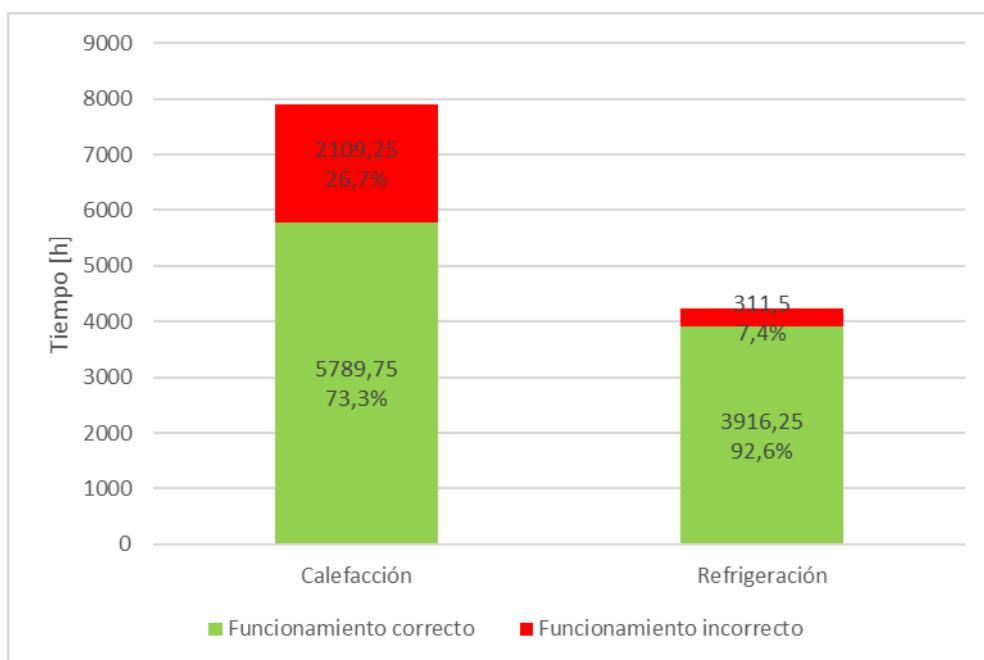
- El resto de casos

En la Tabla 4 se muestra el tiempo de funcionamiento en horas. Como se puede observar, prácticamente el 75% del tiempo analizado los pozos funcionan de forma correcta. Además, el 61% de los datos son en periodo de calefacción.

	Funcionamiento correcto	Funcionamiento incorrecto	Total	
Calefacción	5790	2109,5	7899,5	65%
Refrigeración	3916,25	311,5	4227,75	35%
Total	9706,25	2421	12127,25	
	80%	20%		

Tabla 4: Tiempo de funcionamiento en horas. Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 13 se muestra el tiempo de funcionamiento correcto e incorrecto para cada periodo, viendo que en refrigeración la mayor parte del tiempo funciona de forma correcta, aunque de este periodo tenemos un número menor de datos.

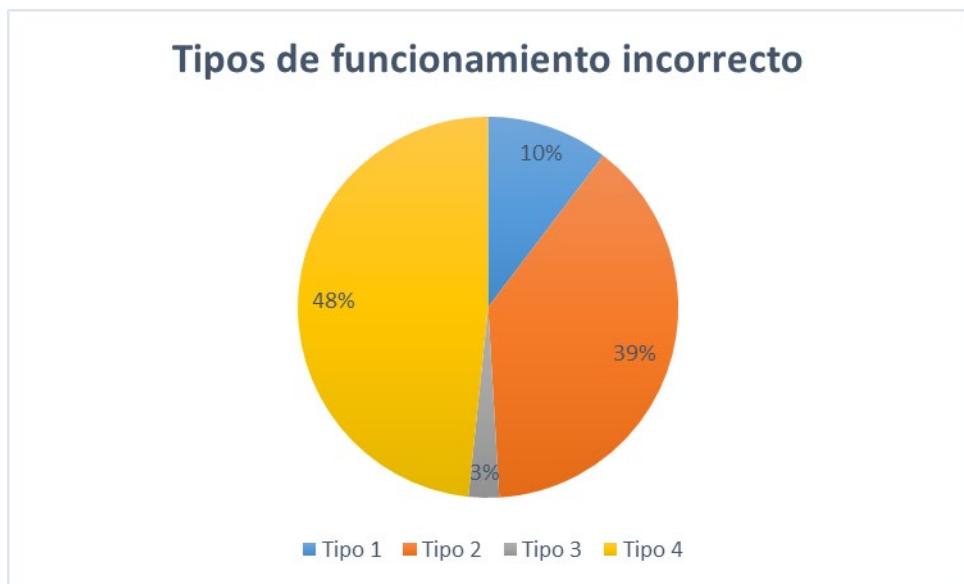


Gráfica 13: Tiempo de funcionamiento en horas en cada periodo. Fuente: Elaboración propia.

Para los 9683 casos o 2420,8 horas en los que el pozo funciona de forma incorrecta, se han determinado los siguientes modos de funcionamiento incorrecto:

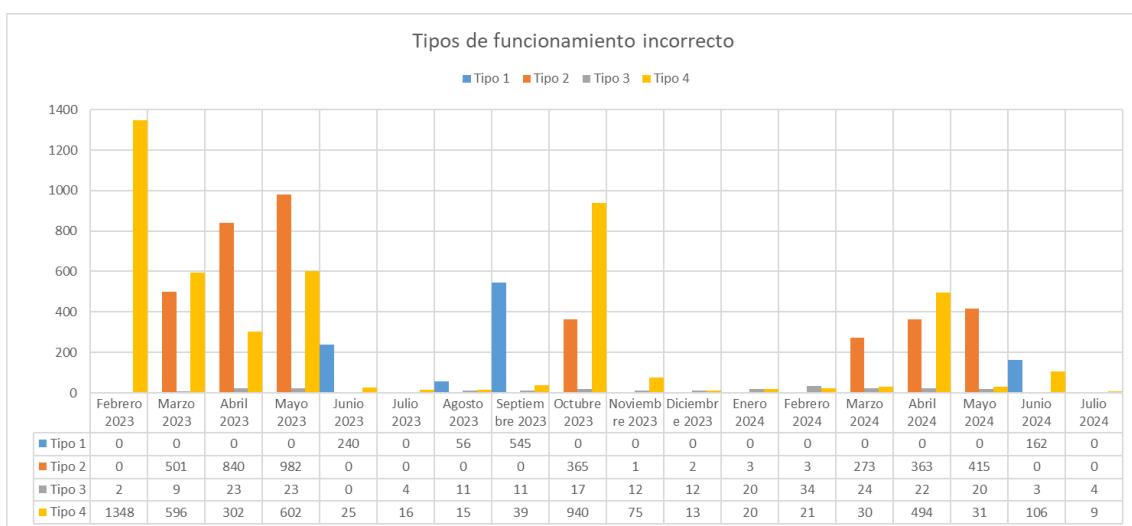
- Tipo 1: El pozo está calefactando cuando debería estar refrigerando.
- Tipo 2: El pozo está refrigerando cuando debería estar calefactando.
- Tipo 3: El pozo está en marcha cuando debería estar parado.
- Tipo 4: El pozo está parado cuando debería estar en marcha.

En la Gráfica 14, se muestra en un gráfico circular el porcentaje de veces que se ha dado cada tipo. Para detectar la causa de los fallos, se ha representado en la Gráfica 15 los modos de fallo por cada mes de todos los datos analizados.



Gráfica 14: Porcentaje de veces que se ha dado cada tipo de fallo en los datos analizados.

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 15: Tipos de fallo segmentado por meses. Fuente: Elaboración propia.

El tipo 1 indica que el pozo está calefactando cuando debería estar refrigerando. Este solo se da en un 10% de los datos incorrectos analizados y, como se puede observar en la Gráfica 15, sucede en junio y septiembre mayoritariamente, debido a los cambios bruscos de temperatura diarios, ya que por el día se refrigerara y por la noche y primeras horas de la mañana se calefacta. También se da en días puntuales de agosto, ya que se enciende el pozo a primeras horas de la mañana para calefactar porque las temperaturas por la noche han disminuido bastante.

El tipo 2 indica que el pozo está refrigerando cuando debería estar calefactando y se da en un 39% de los casos incorrectos. Este fallo se produce principalmente en los meses de primavera y otoño. Para realizar el análisis, esos meses se han determinado en periodo de calefacción, sin embargo, en días calurosos el pozo responde a la demanda y refrigerara en lugar de calefactar.

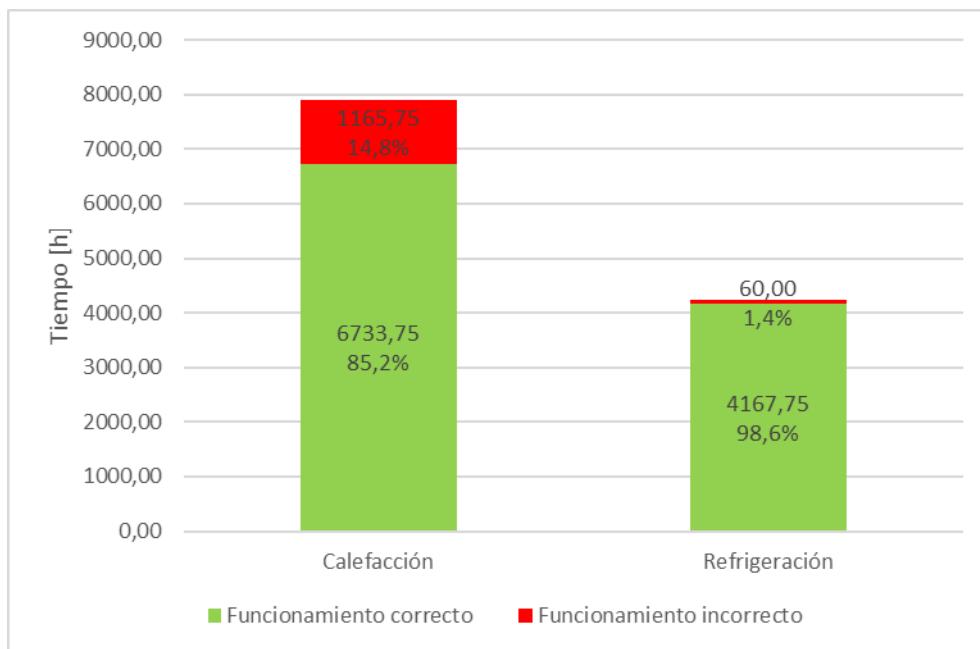
Realmente, para los dos tipos de fallo comentados el pozo no está funcionando de forma incorrecta, sino que responde a la demanda en esos meses de variación térmica de primavera y otoño. En periodos de calefacción en los que el pozo refrigerera debido a las necesidades del Hospital, el ventilador se para o enciende según el criterio de refrigeración, en lugar de con el de calefacción, por lo que no es un error. Lo mismo sucede para el periodo de refrigeración en los que el pozo calefacta.

El tipo 3 indica que el ventilador del pozo está en marcha cuando debería estar parado y, únicamente, se produce en un 3% de los fallos. Sigue en unos pocos instantes puntuales a lo largo de todo el año. El tipo 4 indica que el ventilador del pozo está parado cuando debería estar en marcha, y este fallo es el que más se produce, en un 48% de los casos.

En la mayoría de los casos en los que se produce el fallo de tipo 3, se produce en el arranque del ventilador. En un instante las condiciones de temperatura se dan para que el ventilador se ponga a funcionar, pero este sigue parado dando el fallo tipo 4 y, en el siguiente instante, se enciende, aunque ya no se cumplan las condiciones de temperatura, dando el error tipo 3. El control del ventilador funciona con cierto retraso con respecto a los datos recopilados por las sondas. En otros casos, la temperatura exterior y la de entrada son muy diferentes, y la temperatura exterior varía significativamente entre un instante y el siguiente, enviando una orden de marcha o paro al ventilador, siendo que esta medida de temperatura no se ajusta a la realidad.

En cuanto al fallo tipo 4, anteriormente, en el apartado 4.2.2, ya se ha comentado que en la puesta en marcha en febrero de 2023 el pozo no funciona correctamente.

Considerando como modos correctos de funcionamiento los fallos tipos 1 y 2 y lo que sucede en el apartado anterior, se vuelve a representar el tiempo de funcionamiento correcto e incorrecto en la Gráfica 16.



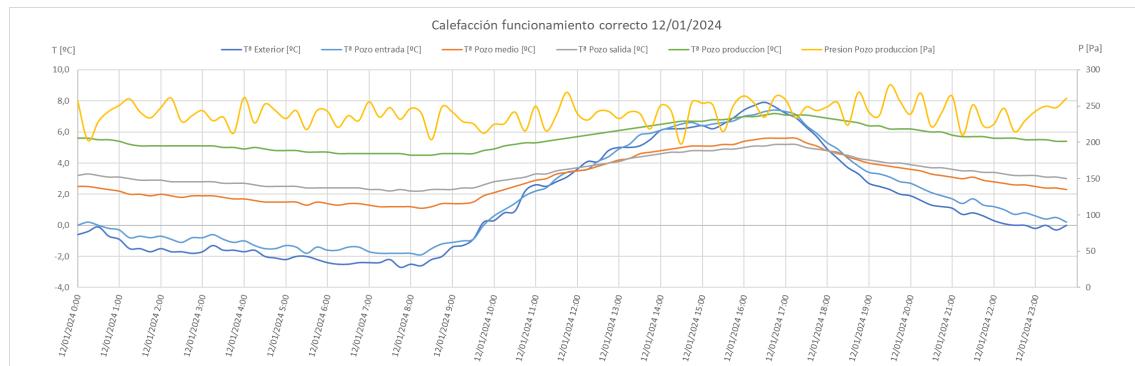
*Gráfica 16: Tiempo de funcionamiento en horas en cada periodo tras el análisis de fallos.
Fuente: Elaboración propia.*

Según el conjunto de datos analizados, el pozo funciona mejor en períodos de refrigeración, mientras que en períodos de calefacción el control del ventilador tiene un peor funcionamiento. Si bien es cierto, el 35% de los datos son en periodo de refrigeración frente al 65% en calefacción.

4.2.6 Días tipo

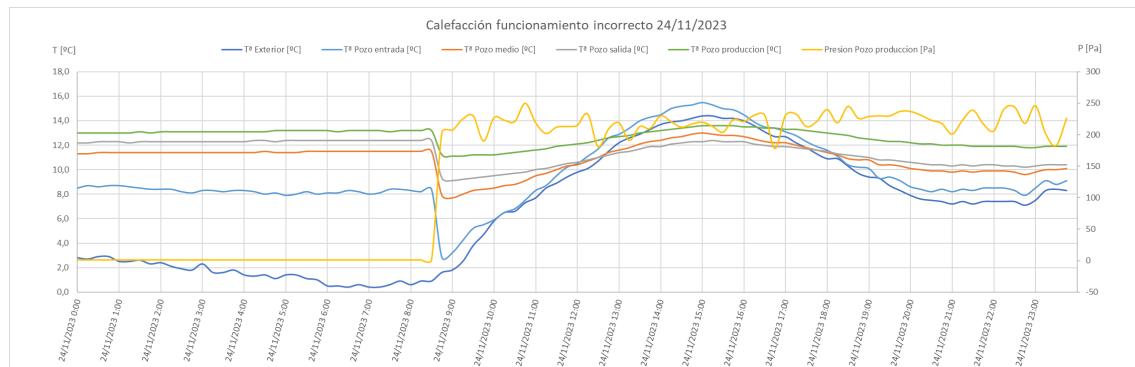
A continuación, se representan varios días tipo en función del periodo al que corresponde y del correcto o incorrecto funcionamiento del pozo:

- Calefacción, funcionamiento correcto: 12/01/2024



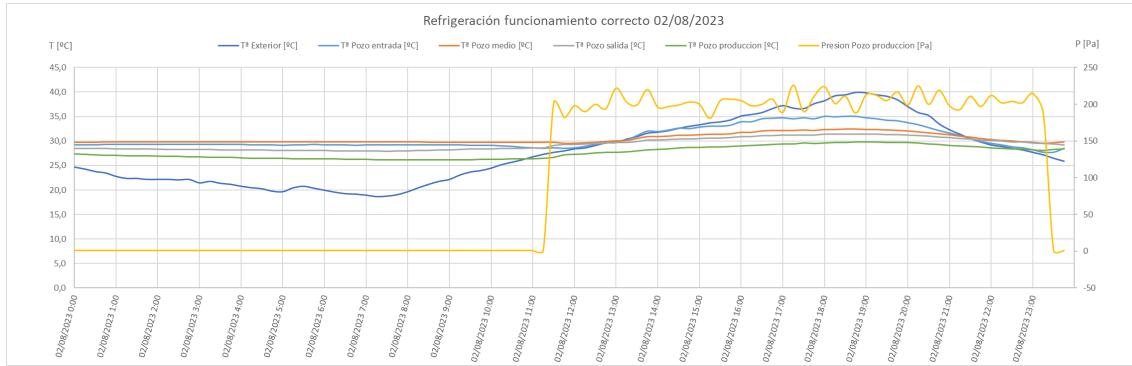
Gráfica 17: Representación de un día tipo en periodo de calefacción funcionando correctamente. Ver ANEXO I. Fuente: Elaboración propia.

- Calefacción, funcionamiento incorrecto: 24/11/2023



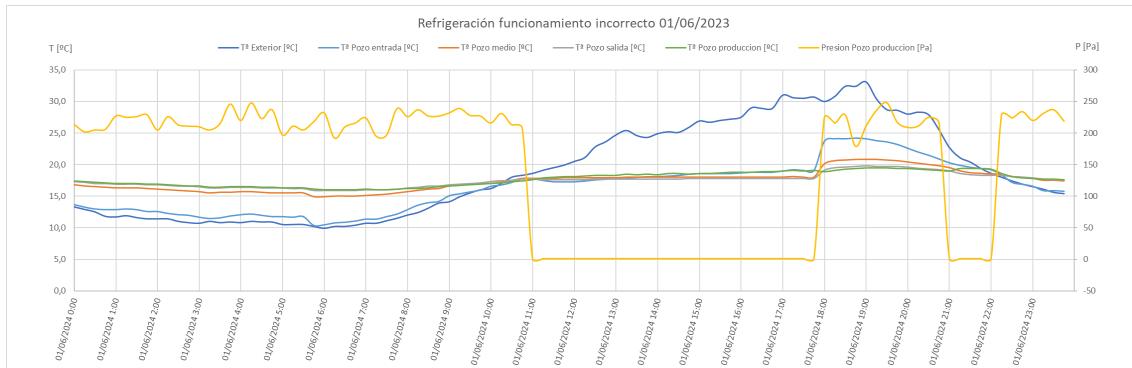
Gráfica 18: Representación de un día tipo en periodo de calefacción funcionando incorrectamente. Ver ANEXO I. Fuente: Elaboración propia.

- Refrigeración, funcionamiento correcto: 16/08/2023



Gráfica 19: Representación de un día tipo en periodo de refrigeración funcionando correctamente. Ver ANEXO I. Fuente: Elaboración propia.

- Refrigeración, funcionamiento incorrecto: 01/06/2024



Gráfica 20: Representación de un día tipo en periodo de refrigeración funcionando incorrectamente. Ver ANEXO I. Fuente: Elaboración propia.

4.2.7 Análisis energético

Se ha realizado un análisis energético de funcionamiento correcto e incorrecto segmentado en los períodos definidos inicialmente de calefacción y refrigeración. En cada uno de ellos se divide también en momentos en los que está calefactando o refrigerando, con respecto a las estaciones de primavera y otoño en las que se requiere de ambos servicios.

Se ha calculado la energía térmica aportada por el pozo en funcionamiento correcto, es decir:

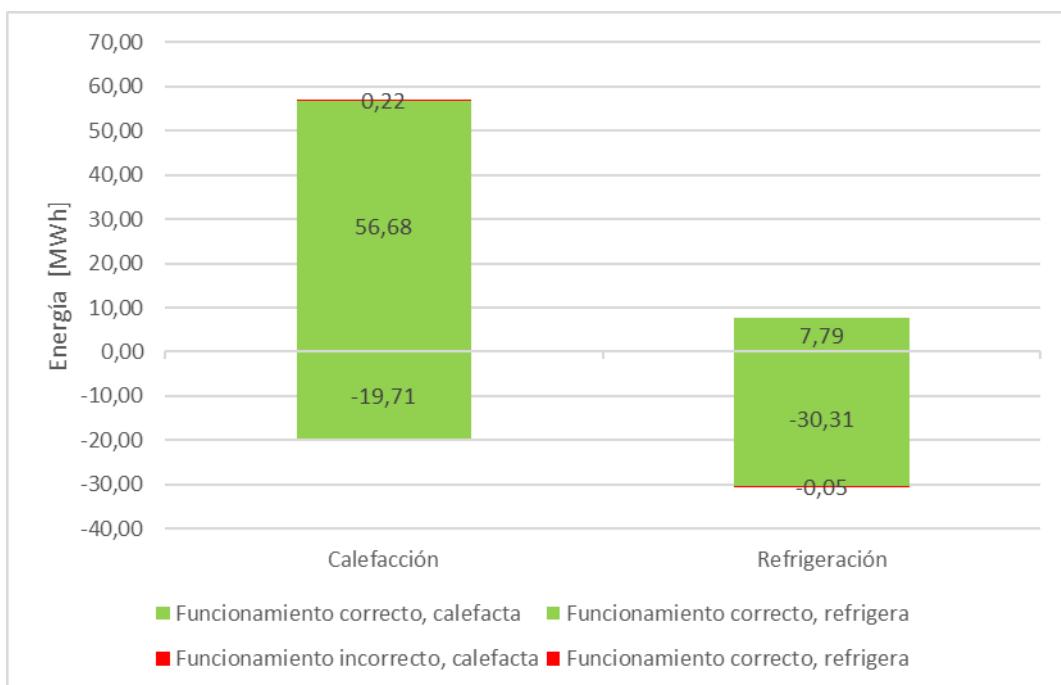
- Energía absorbida por el aire al calefactar cuando el pozo funciona de forma correcta.
- Energía cedida por el aire cuando el pozo funciona de forma correcta.
- Energía total de los dos períodos.

También se ha calculado la energía térmica consumida por el pozo en funcionamiento incorrecto, de la misma forma que anteriormente, pero para los casos de funcionamiento incorrecto.

En la Tabla 5 en la Gráfica 21 se muestran los resultados obtenidos. De los 114,5 MWh que son aportados por el pozo, 64,5 MWh han sido para precalentar el aire y 50 MWh para preefriararlo. Por otra parte, se han consumido 0,26 MWh debido al funcionamiento incorrecto del sistema.

	Funcionamiento correcto		Funcionamiento incorrecto	
	Calefacta	Refrigera	Calefacta	Refrigera
Calefacción	56,68	-19,71	0,22	0,00
Refrigeración	7,79	-30,31	0,00	-0,05
Total	64,48	-50,02	0,22	0,05
	114,50		0,26	

Tabla 5: Energía térmica en MWh. Fuente: Elaboración propia.

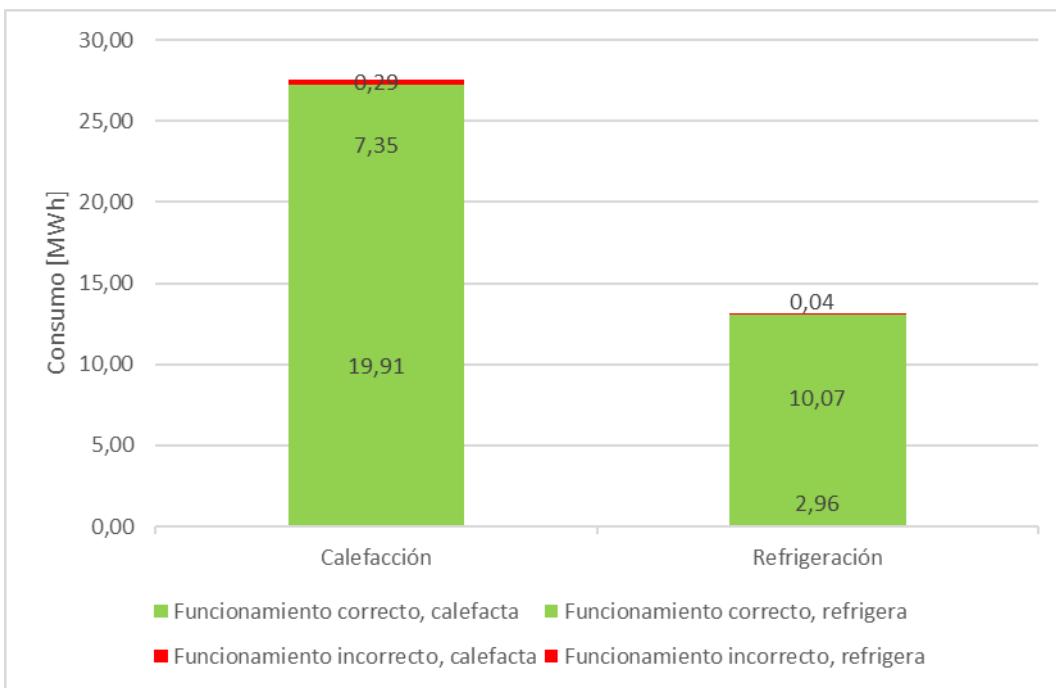


Gráfica 21: Energía térmica en MWh. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6 y en la Gráfica 22 se muestran los resultados obtenidos del consumo eléctrico del pozo. Únicamente se consumen 0,33 MWh debido al funcionamiento incorrecto del pozo, es decir, menos de un 1% del consumo.

	Funcionamiento correcto		Funcionamiento incorrecto	
	Calefacta	Refrigera	Calefacta	Refrigera
Calefacción	19,91	7,35	0,29	0,00
Refrigeración	2,96	10,07	0,00	0,04
Total	22,88	17,42	0,29	0,04
	40,29		0,33	

Tabla 6: Consumo eléctrico en MWh. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 22: Consumo eléctrico en MWh. Fuente: Elaboración propia.

Para ver el rendimiento del pozo en cada periodo se va a calcular el SCOP y el SEER con los resultados obtenidos de energía y consumo en buen funcionamiento:

$$SCOP = \frac{\text{Energía térmica aportada en calefacción}}{\text{Consumo eléctrico en calefacción}} = \frac{64,48 \text{ MWh}}{22,88 \text{ MWh}} = 2,82$$

$$SEER = \frac{\text{Energía térmica aportada en refrigeración}}{\text{Consumo eléctrico en refrigeración}} = \frac{50,02 \text{ MWh}}{17,42 \text{ MWh}} = 2,87$$

La eficiencia energética anual es muy similar para calefacción y refrigeración, siendo ligeramente mayor en periodos de refrigeración.

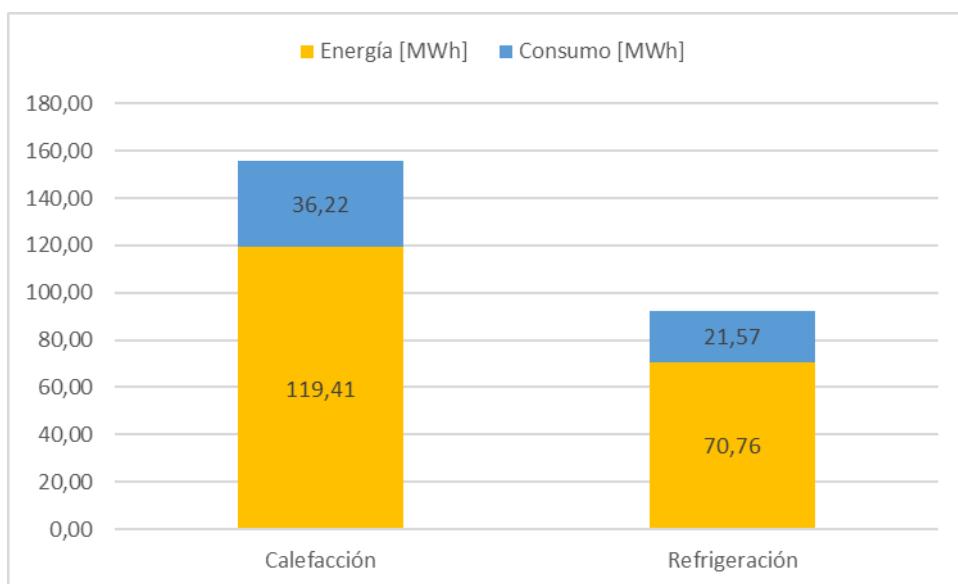
5 PROPUESTAS DE MEJORA

Para finalizar, se van a realizar varias propuestas para optimizar el sistema, las tres primeras se refieren a variar el sistema de control del ventilador, y las dos últimas a otro tipo de mejora.

5.1 Propuesta 1

Como se ha comentado anteriormente, la temperatura de entrada a los tubos difiere bastante de la temperatura exterior y, además, esta última sufre de grandes oscilaciones diariamente. Por ello, se propone cambiar el criterio de funcionamiento del pozo ligeramente, estableciendo el inicio y la parada del ventilador con respecto a la temperatura de entrada, en lugar de la temperatura exterior. Es decir, en invierno el pozo se pondría en marcha cuando la temperatura de producción estuviese un grado por encima de la de entrada a los tubos, y se pararía cuando estuviera un grado por debajo. En verano el pozo se pondría en funcionamiento cuando la temperatura de producción estuviese un grado por debajo de la temperatura de entrada, y pararía cuando la temperatura de producción estuviera un grado por encima de la de entrada.

Aplicando este cambio de control en los datos recopilados se obtendrían un SCOP de 3,30 y un SEER de 3,28, con los resultados que se muestran en la Gráfica 23.



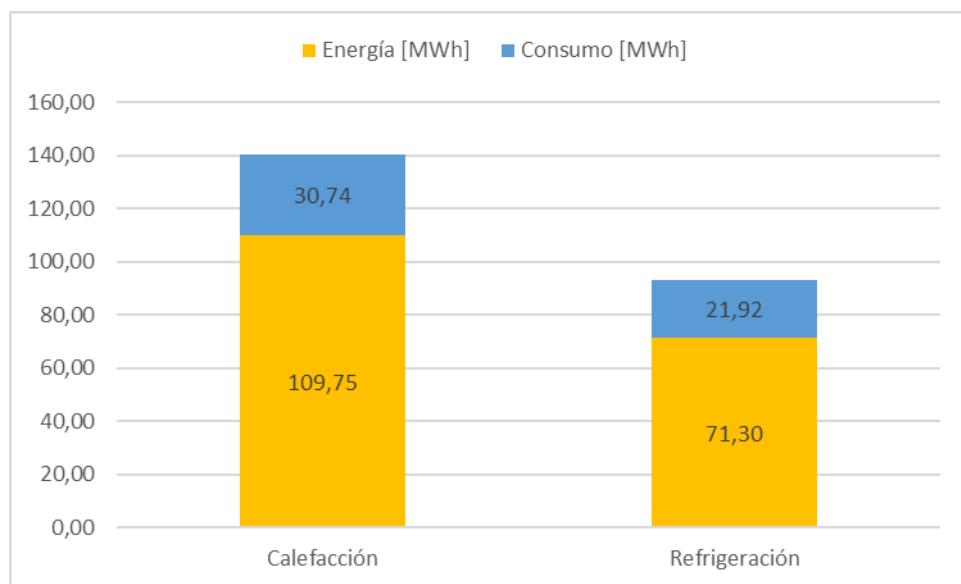
Gráfica 23: Resultados de potencia y consumo de la propuesta 1. Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que este sistema de control podría dar un problema de arranque del sistema, ya que el aire de entrada a los tubos inicialmente se mantendría a temperatura del terreno. Sería necesario arrancar con la temperatura exterior y, una vez estabilizado el sistema, seguir el control con la temperatura de entrada a los tubos, como se ha comentado. Lo ideal sería colocar la sonda exterior en una nueva ubicación que proporcione datos menos influenciados por los distintos factores climáticos exteriores.

5.2 Propuesta 2

La segunda propuesta de control es comparar la temperatura de entrada del aire con la temperatura media del suelo a la profundidad a la que se encuentran los tubos, para ver si el intercambio es eficiente. Para realizarlo de forma correcta sería necesaria colocar una sonda en el terreno a esa profundidad que midiese la temperatura real en cada instante. En invierno el pozo se pondría a funcionar cuando la temperatura de entrada a los tubos fuese un grado inferior a la temperatura del suelo, y se pararía cuando ambas temperaturas fuesen iguales. En verano el pozo se pondría en marcha cuando la temperatura de entrada estuviese un grado por encima de la temperatura del suelo, y pararía de nuevo cuando ambas temperaturas fuesen iguales.

Para una primera aproximación se ha utilizado la Ecuación (1) del apartado 4.1 para estimar dicha temperatura, obteniendo un SCOP de 3,57 y un SEER de 3,25, con los resultados que se muestran en la Gráfica 23.

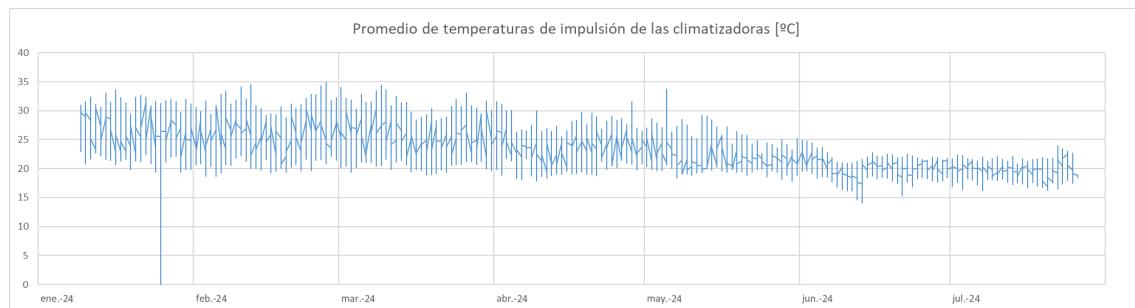


Gráfica 24: Resultados de potencia y consumo de la propuesta 2. Fuente: Elaboración propia.

5.3 Propuesta 3

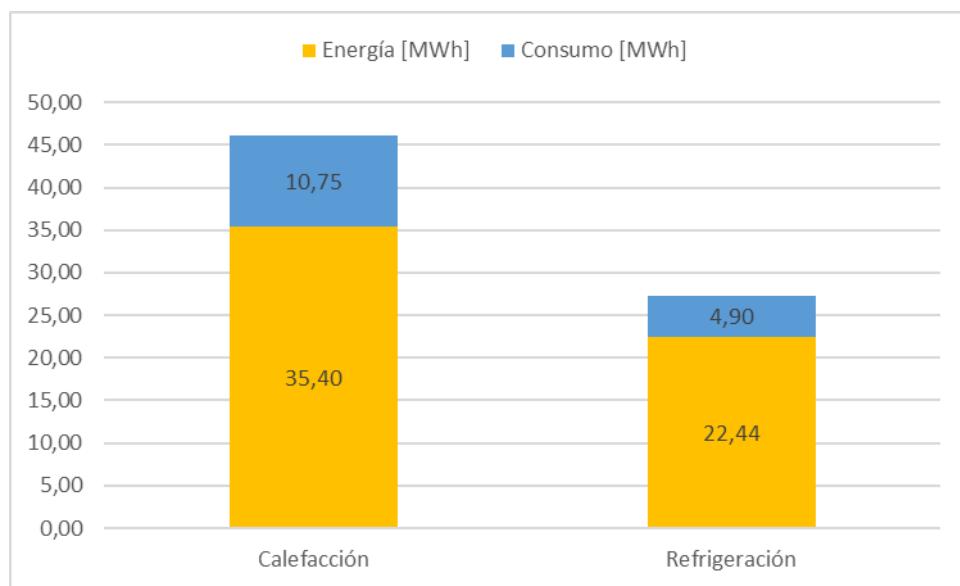
En el control actual y en las dos anteriores propuestas no se ha tenido en cuenta la temperatura de impulsión de las climatizadoras, cuando la utilidad de los pozos canadienses es pretratar el aire primario que entra en las climatizadoras para que tengan que superar menor salto térmico. Esta propuesta de control se basa en comparar la temperatura de impulsión de las climatizadoras con la temperatura exterior y la de producción de forma que el ventilador se ponga en funcionamiento si la diferencia entre la temperatura de producción y la de impulsión es menor que la diferencia entre la exterior y la de impulsión. De esta forma, las climatizadoras cogerán el aire primario del exterior o del intercambiador para aportar el menor salto térmico posible.

Para realizar un cálculo aproximado, se utilizan los datos recopilados de las 6 climatizadoras de aporte y las 3 de tratamiento. Se han recogido las temperaturas de impulsión y retorno de todas ellas cada 15 minutos durante el año 2024, por lo que este cálculo se realiza con menos datos que las anteriores propuestas. Como el pozo canadiense aporta aire a todas las climatizadoras, se ha realizado el promedio de las temperaturas de impulsión de todas ellas y se ha representado en la Gráfica 25.



Gráfica 25: Promedio de temperaturas de impulsión de las climatizadoras [°C]. Fuente: Elaboración propia.

Se obtiene un SCOP de 3,29 y un SEER de 4,58, con los resultados que se muestran en la Gráfica 26.



Gráfica 26: Resultados de potencia y consumo de la propuesta 3. Fuente: Elaboración propia.

5.4 Propuesta 4

Para mejorar la eficiencia energética del pozo canadiense instalado, se propone analizar y seleccionar una alternativa al ventilador actual (modelo CDXRT-630-7.5 de la marca Sodeca). Los principales criterios considerados para la selección son:

- Debe tener al menos una capacidad máxima de 29900 m³/h para ser compatible con el sistema existente actual y ser capaz de proporcionar un caudal de aire adecuado para el correcto funcionamiento del pozo canadiense y de los climatizadores.

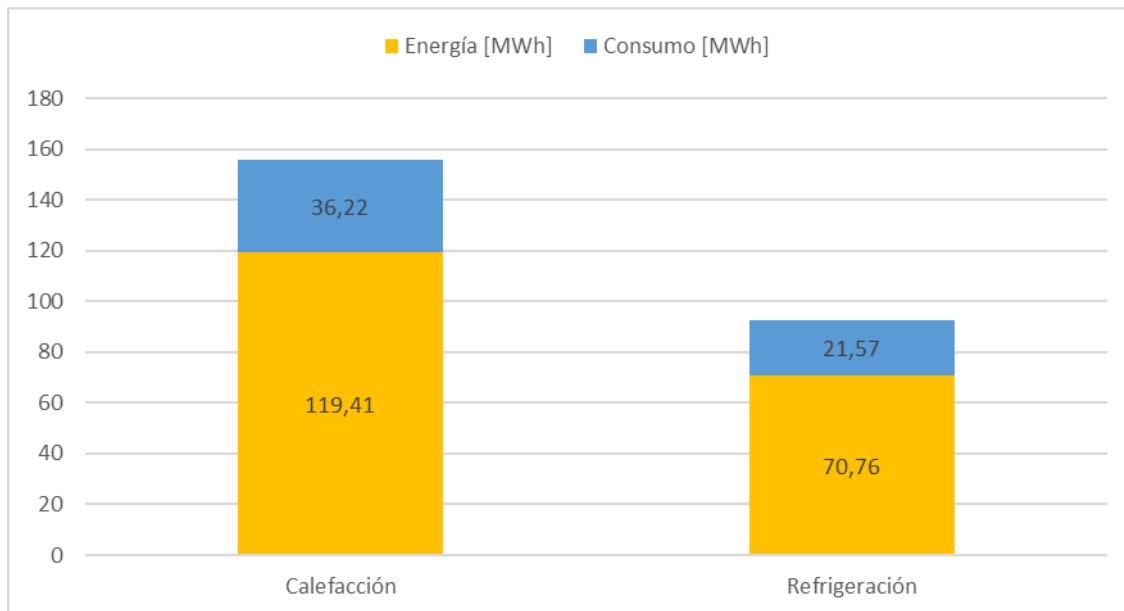
- Ventilador centrífugo de doble aspiración con álabes hacia atrás, igual que el existente. Este tipo de ventilador genera una elevada presión estática, adecuada para mover aire a través de conductos largos.
- Debe cumplir con los estándares internacionales de eficiencia, como las normativas ErP aplicables en la Unión Europea.
- Variador de frecuencia (VFD) para regular el caudal de aire según las necesidades del Hospital. Al ajustar la velocidad de operación del ventilador, se reduce la potencia requerida en condiciones de baja demanda, optimizando el consumo energético. Además, también reduce el desgaste de los componentes, prolongando la vida útil del equipo.

Se ha seleccionado el ventilador DFR 501 N6A de la marca Soler&Palau. En la Tabla 7, se comparan diversas propiedades del motor existente y el propuesto.

	CDXRT-630-7.5	DFR 501 N6A
Variador de velocidad	No	Si
Consumo	6,154 kW	5,5 kW
Caudal máximo	29900 m ³ /h	39370 m ³ /h

Tabla 7: Comparativa de propiedades entre el ventilador existente y el propuesto.

Para el ventilador propuesto, con un consumo de 5,5 kW, se obtiene un SCOP de 3,13 y un SEER de 3,21, con los resultados que se muestran en la Gráfica 27. Cabe destacar, que se han realizado los cálculos para este consumo constante, sin aplicar la variación de frecuencia.



Gráfica 27: Resultados de potencia y consumo de la propuesta 4. Fuente: Elaboración propia.

Por el contrario, también existe la opción de agregarle un variador de frecuencia al ventilador existente para reducir el consumo en momentos de baja carga.

5.5 Propuesta 5

Durante la estación invernal, las principales necesidades energéticas de los edificios suelen estar orientadas a la calefacción. Sin embargo, ciertos espacios con características específicas presentan una elevada carga térmica latente y sensible. En estos casos, cuando las condiciones del aire exterior son favorables, puede ser más eficiente utilizar ese aire para enfriar el interior, usando el sistema de free-cooling. Este debe permitir mediante un control adecuado seleccionar las diferentes situaciones que se pueden plantear de cargas internas y climáticas, actuando sobre las compuertas de aire y los equipos que deben estar en operación, para conseguir que el aire de impulsión alcance las condiciones higrotérmicas adecuadas con el menor coste energético. Cuando la entalpía o, según el caso, la temperatura del aire exterior es inferior a la del aire extraído del interior del local, resulta energéticamente más eficiente aprovechar el aire exterior en lugar de recircular el aire de retorno. Este enfoque permite una gestión más sostenible y económica del consumo energético.

Por ello, otra propuesta de mejora sería incluir en el sistema de control un criterio para el funcionamiento del free-cooling, haciendo que el ventilador del pozo deje de funcionar en los momentos en los que sea más conveniente el sistema de free-cooling. Para que este sistema se active se deben cumplir tres criterios:

- La temperatura exterior debe ser menor a la temperatura en el interior de la vivienda.
- La temperatura del interior de la vivienda tiene que superar la temperatura interior máxima, la establecida de confort en épocas cálidas, habitualmente 24°C.
- La temperatura exterior tiene que ser superior a una temperatura mínima, para no introducir aire excesivamente frío.

5.6 Comparativa

En cuanto a las cuatro primeras propuestas de control, en la Tabla 8 se muestra una comparativa de los resultados obtenidos.

		Actual	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3	Propuesta 4
Calefacción	Energía aportada [MWh]	64,48	119,41	109,75	35,40	119,41
	Consumo [MWh]	20,88	36,22	30,74	10,75	36,22
	SCOP	2,82	3,30	3,57	3,29	3,13
Refrigeración	Energía aportada [MWh]	50,02	70,76	71,30	22,44	70,76
	Consumo [MWh]	17,42	21,57	21,92	4,90	21,57
	SEER	2,87	3,28	3,25	4,58	3,21

Tabla 8: Comparativa entre el sistema de control actual y el de las propuestas 1, 2 y 3.

Los resultados obtenidos no son comparables entre ellos al 100% debido a varios factores:

- Datos analizados: En la propuesta 3 se han analizado un número menor de datos que en el resto.
- Caudal de aire del ventilador: En las propuestas 1, 2 y 3 se ha considerado que cuando el ventilador está encendido, este proporciona un caudal constante, siendo este el máximo de $29900 \text{ m}^3/\text{h}$. A diferencia de en la realidad que el caudal varía ligeramente.

Además, las propuestas calculadas tienen un comportamiento ideal, sin fallos reales como las paradas producidas en la instalación existente

Con la propuesta 2, realizando el control del sistema con la temperatura de entrada en lugar de la exterior, se obtiene el mayor SCOP, mientras que con la propuesta 3, planteando el sistema de control con las temperaturas de impulsión de las climatizadoras, el mayor SEER.

En cuanto a la propuesta 4, con el cambio de ventilador se aprecia una mejora en el rendimiento estacional disminuyendo el consumo a 5,5 kW. En el cálculo no está aplicada la variación de frecuencia, por lo que la optimización realmente sería todavía mayor. Aunque actualmente el cambio de ventilador no es viable ya que la instalación es nueva y supondría un gran sobrecoste, se le puede instalar un variador de frecuencia. De igual forma, si en un futuro lejano se renuevan las instalaciones esta podría ser una opción a plantear.

Entre todas las propuestas comentadas, algunas de ellas se podrían implementar simultáneamente para optimizar el funcionamiento del sistema de pozos canadienses. Una buena opción sería modificar la ubicación de la sonda exterior, realizar el control de free-cooling, añadir un variador de frecuencia en el motor del ventilador y modificar el sistema de control en relación con las temperaturas de impulsión, como se ha comentado en la tercera propuesta.

6 CONCLUSIONES

Los cuatro edificios analizados de Aragón coinciden en la dimensión del diámetro, 30 centímetros aproximadamente, y en la profundidad, entre 4 y 6 metros, adaptados a las condiciones del subsuelo de Zaragoza y Huesca, donde las temperaturas son bastante equivalentes. Sin embargo, la longitud de los tubos varía significativamente, entre 25 y 75 metros, ya que esto depende del terreno disponible y las necesidades de ventilación del edificio. Asimismo, el número y disposición de los tubos se ajustan a las demandas específicas de aire primario, mostrando adaptaciones particulares para cada caso.

El análisis realizado sobre el intercambiador tierra-aire instalado en la Unidad de Urgencias del Hospital San Jorge de Huesca ha permitido evaluar su funcionamiento, eficiencia energética y contribución al ahorro de energía. Este sistema se ha mostrado especialmente útil en grandes edificaciones que requieren elevados volúmenes de aire primario donde su capacidad para preacondicionar el aire permite reducir significativamente el consumo energético de los sistemas tradicionales de climatización. No obstante, su implementación implica un mayor coste inicial, compensado por su rendimiento estacional y los beneficios a largo plazo.

Para realizar el estudio se recopilaron una gran cantidad de datos en intervalos de 15 minutos durante el periodo comprendido entre enero de 2023 y octubre de 2024. Estos datos abarcan temperaturas, humedades relativas y presión en diferentes puntos del sistema. Durante este tiempo, se han identificado varios períodos en los que el sistema no estuvo operativo, ya sea por fallos técnicos o por paradas programadas para mantenimiento. Estos lapsos de inactividad, aunque limitados, reflejan la importancia de un mantenimiento regular y una monitorización constante para garantizar el funcionamiento óptimo del sistema.

El análisis de las temperaturas ha mostrado que la temperatura de entrada a los tubos difiere de la exterior considerablemente, y que la temperatura exterior presenta variaciones diarias bruscas, lo que ha dado lugar a identificar un problema con la colocación de la sonda exterior. Esto puede haber afectado a la precisión de algunos registros, por lo que la potencia térmica se ha calculado considerando la temperatura de entrada en lugar de la exterior. Comparando la temperatura de salida con la de producción, se ha evidenciado que el segundo tubo grande sigue aportando energía al aire, tanto en calefacción como en refrigeración, optimizando así la transferencia térmica en cada etapa del sistema. En total, el pozo aportó 114,5 MWh de energía térmica: 64,5 MWh para calefacción y 50 MWh para refrigeración. Únicamente se han consumido 0,26 MWh debido al funcionamiento incorrecto del sistema.

En términos de consumo energético, el ventilador ha consumido un promedio de 6,137 kW en operación, ligeramente superior al valor de ficha técnica de 5,5 kW. Este consumo acumulado asciende a 40,29 MWh a lo largo del periodo analizado, 22,88 MWh destinados a calefacción y 17,42 MWh a refrigeración. Las pérdidas derivadas del funcionamiento incorrecto del ventilador son 0,33 MWh, representan menos del 1% del consumo total, aunque subrayan la necesidad de optimizar el sistema de control. Actualmente, el control del ventilador presenta desfases en su respuesta a las condiciones térmicas del entorno, lo que ha ocasionado tanto paradas innecesarias como arranques en momentos inadecuados. Mejorar este aspecto podría incrementar aún más la eficiencia del sistema.

Otro aspecto destacado es la condensación, con más de 6.600 litros acumulados entre 2023 y 2024, fenómeno ocurre principalmente en el primer banco de tubos y, en menor medida, en el segundo tubo. Los valores obtenidos reflejan el impacto estacional del pozo, siendo los meses de invierno los que registran mayores cantidades de agua condensada.

En cuanto a la eficiencia estacional, el pozo ha alcanzado un SCOP de 2,82 y un SEER de 2,87, con un rendimiento ligeramente superior en los períodos de refrigeración frente a los de calefacción.

Finalmente, se proponen varias líneas de mejora, para maximizar el rendimiento del sistema. Tres de las propuestas se enfocan en una reprogramación del sistema de control del pozo, de forma que se reduzcan los fallos de funcionamiento, mejore el rendimiento estacional y se optimice dicho control para ajustarlo lo más posible a la realidad. En términos de equipamiento, se plantea sustituir el ventilador actual por uno más eficiente con variador de frecuencia, lo que reduciría significativamente el consumo energético. Además, también se ha recomendado implementar un sistema de free-cooling que permita aprovechar el aire exterior en condiciones favorables, disminuyendo la necesidad de enfriamiento mecánico. Estas propuestas pueden combinarse para maximizar el rendimiento del sistema, incluyendo la integración del free-cooling, añadiendo un variador de frecuencia al ventilador y optimizando del control según las condiciones de impulsión y reubicando la sonda exterior

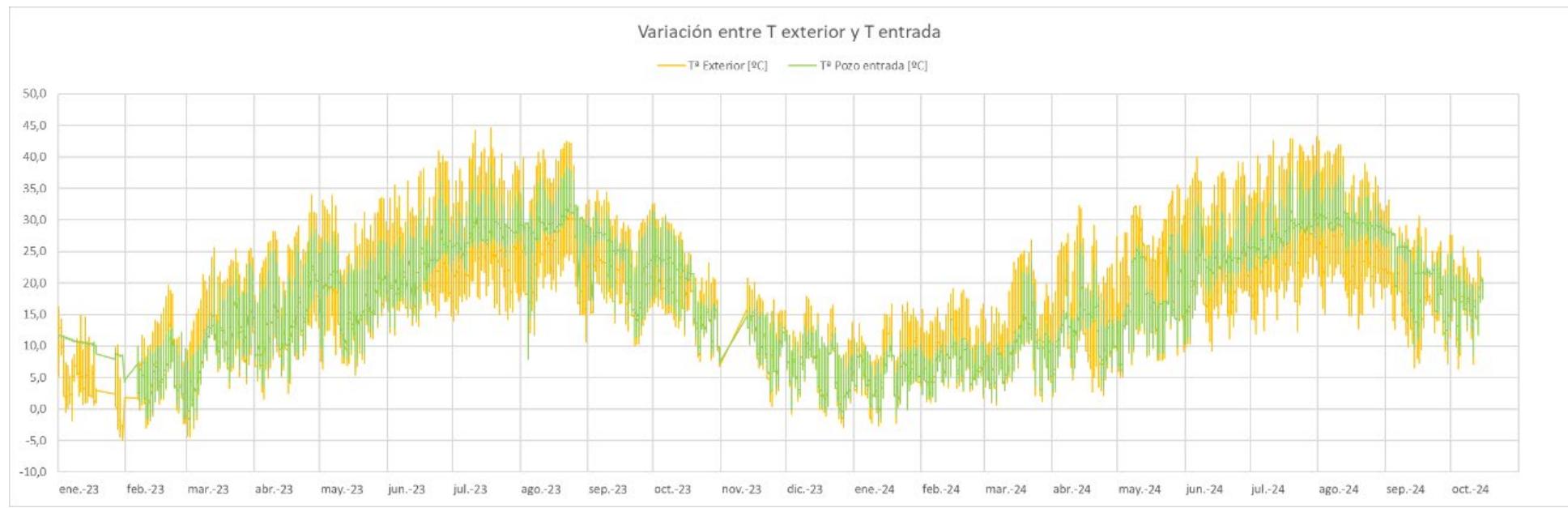
7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Hollmuller, B. Lachal y D. Pahud, «Rafraîchissement par geocooling: Bases pour un manuel de dimensionnement.,» *Cuepe*, vol. 5, 2005.
- [2] J. Escuer, «Intercambiadores tierra-aire en la climatización de construcciones. Pozos provenzales y técnicas emparentadas.,» [En línea]. Available: <http://www.geoconsultores.org/ficheros/10351934d072e37e99e71a43de3ad64a.pdf>.
- [3] G. d. España, Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, Madrid, 2007.
- [4] ATECYR, «Ahorro y eficiencia energética en climatización. Guía técnica 14. Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado.,» IDAE, Madrid, 2012.
- [5] ATECYR, «Ahorro y eficiencia energética en climatización. Guía técnica 12. Condiciones climáticas exteriores de proyecto.,» IDAE, Madrid, Junio 2010.
- [6] Instituto Geológico y Minero de España, «Centro Nacional IGME - CSIC,» [En línea]. Available: <https://www.igme.es/datos-y-mapas/visor-de-mapas/>.
- [7] G. Chiesa, M. Simonetti y M. Grosso, «A 3-field earth-heat-exchange system for a school building in Imola, Italy: Monitoring results.,» *Renewable Energy*, vol. 62, pp. 563-570, 2014.
- [8] C. Dewangan, A. K. Shukla, R. Salhotra y A. Dewan, «Analysis of an earth-to-air heat exchanger for enhanced residential thermal comfort,» *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 43, nº 3, 2024.
- [9] J. L. Ferrer, «Así son los pozos canadienses: solución natural y barata para climatizar la casa,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.sport.es/es/noticias/medio-ambiente/pozos-canadienses-solucion-natural-barata-77155159>.
- [10] H. Bouhess, H. Hamdi, B. Benhamou, A. Bennouna, P. Hollmuller y K. Limam, «Dynamic simulation of an earth-to-air heat exchanger connected to a villa type house in Marrakech.,» de *Proceedings of Building Simulation 2013: 13th Conference of IBPSA*, Chambery, France, 2013.
- [11] D. Thevenard, «Earth-to-air Heat Exchanger Design Evaluation,» Numerical Logics Inc., Waterloo, Canada, 2008.

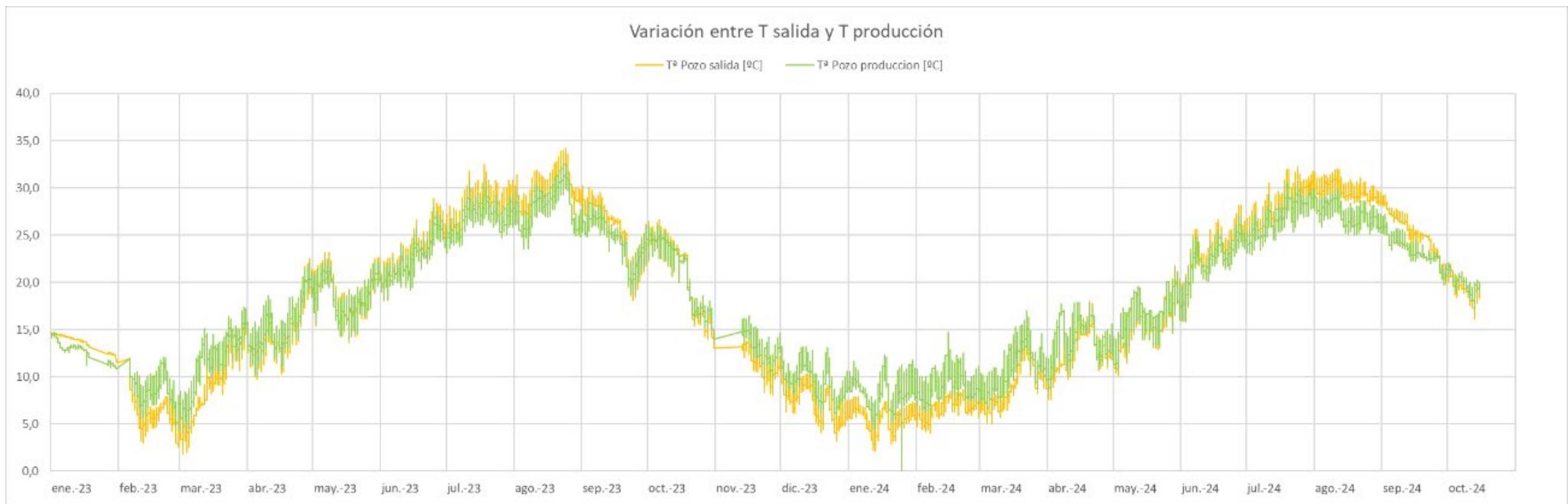
- [12] A. María Cabezas, «Eficiencia energética a través de utilización de pozos canadienses con el análisis de datos de un caso real "Casa Pomaret",» Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2012.
- [13] M. Sánchez Iturbe, «Eficiencia Energética de un edificio EECN: uso combinado de intercambiador tierra-aire y efecto invernadero.,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2014.
- [14] J. González Debén, «El intercambiador tierra-aire. Guía de aplicación en Madrid.,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2019.
- [15] I. Edo Escudero, «Estado del arte de intercambiadores de calor tierra-aire. Implementación de un software de prediseño.,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2021.
- [16] J. Pfafferott, «Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency.,» *Energy and Buildings*, vol. 35, pp. 971-983, 2003.
- [17] M. Khabbaz, B. Benhamou, K. Limam, H. Hamdi, A. Bennouna y P. Hollmuller, «Experimental Monitoring of an EAHX for Building Air Refreshment in Marrakech,» de *Mediterranean Green Energy Forum*, Marrakech, 2015.
- [18] S. Medved, «Ground heat exchangers for air pre-heating and pre-cooling,» University of Liubliana, Liubliana, Slovenia, 2010.
- [19] «Pozo canadiense,» Econova, [En línea]. Available: <https://econova-institute.com/pozo-canadiense-para-la-calefaccion/>.
- [20] «Pozos canadienses: Tecnología natural de bajo coste para climatizar tu casa ahorrando energía.,» EcoInventos, 2022. [En línea]. Available: <https://ecoinventos.com/pozos-canadienses/>.
- [21] ATECYR, «Ahorro y eficiencia energética en climatización. Guía técnica 0. Ahorro y recuperación de energía en instalaciones de climatización.,» IDAE, Madrid, 2012.
- [22] M. Sánchez Iturbe, «Eficiencia Energética de un edificio EECN: uso combinado de intercambiador tierra-aire y efecto invernadero.,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2014.

ANEXO I. GRÁFICAS

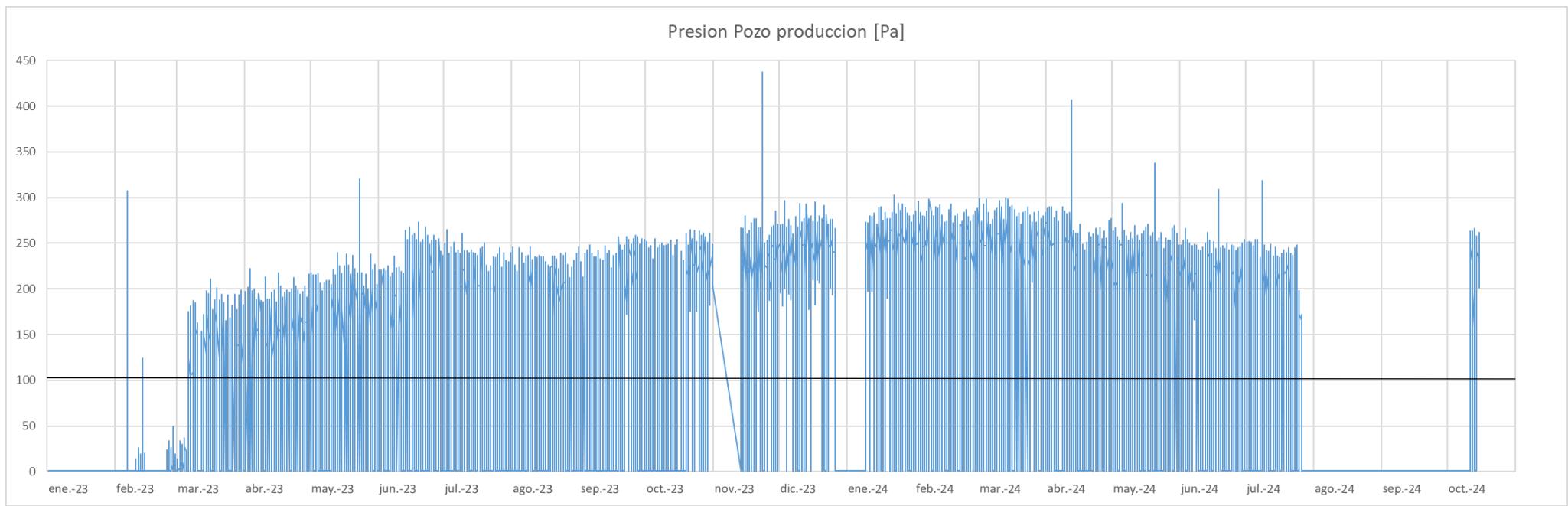
En el presente Anexo se muestran diversas gráficas comentadas a lo largo de la memoria a mayor tamaño para visualizarlas bien en caso de ser necesario.



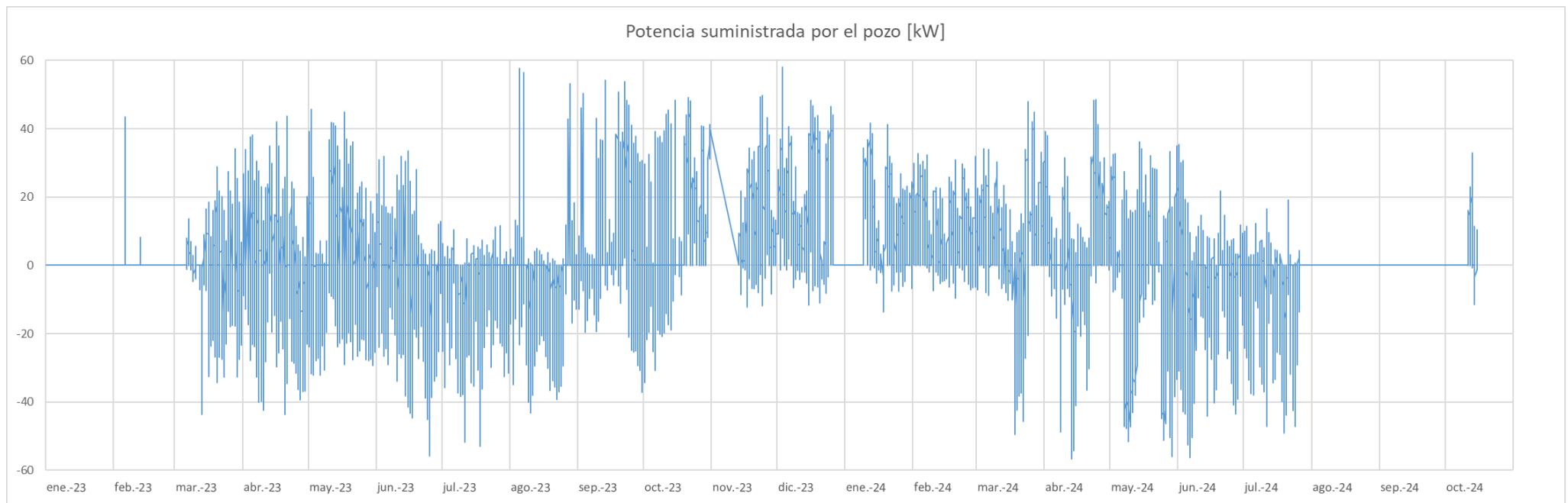
Gráfica 3: Variación de la temperatura exterior y la temperatura de entrada. Fuente: Elaboración propia.



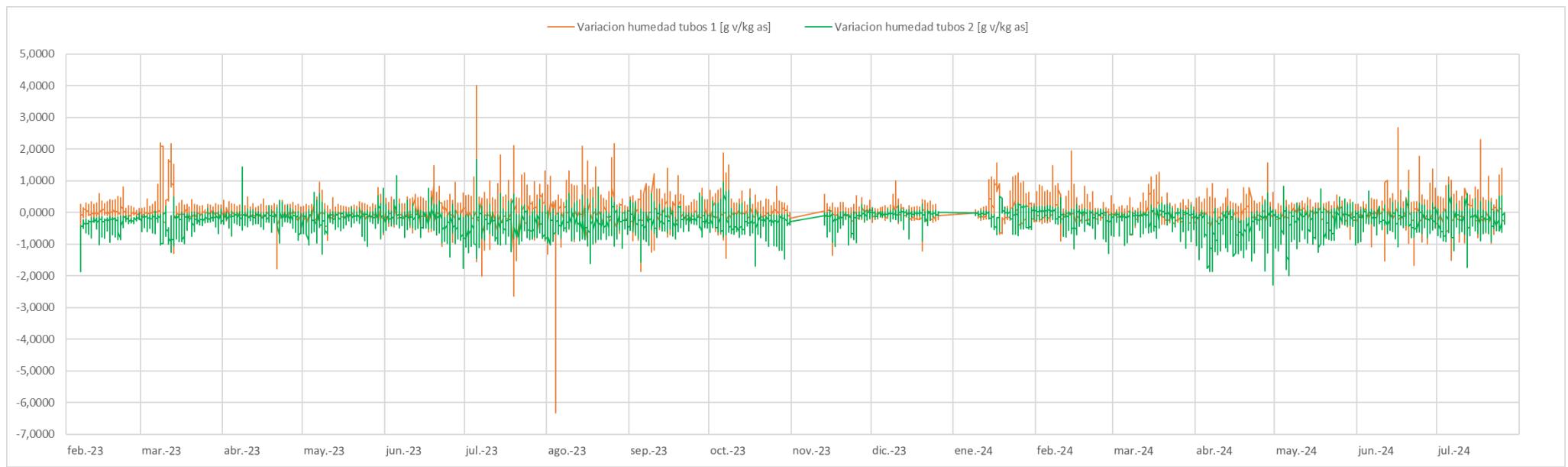
Gráfica 5: Variación de la temperatura de salida y temperatura de producción. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 7: Presión pozo de producción [Pa]. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 8: Potencia suministrada por el pozo [kW]. Fuente: Elaboración propia.



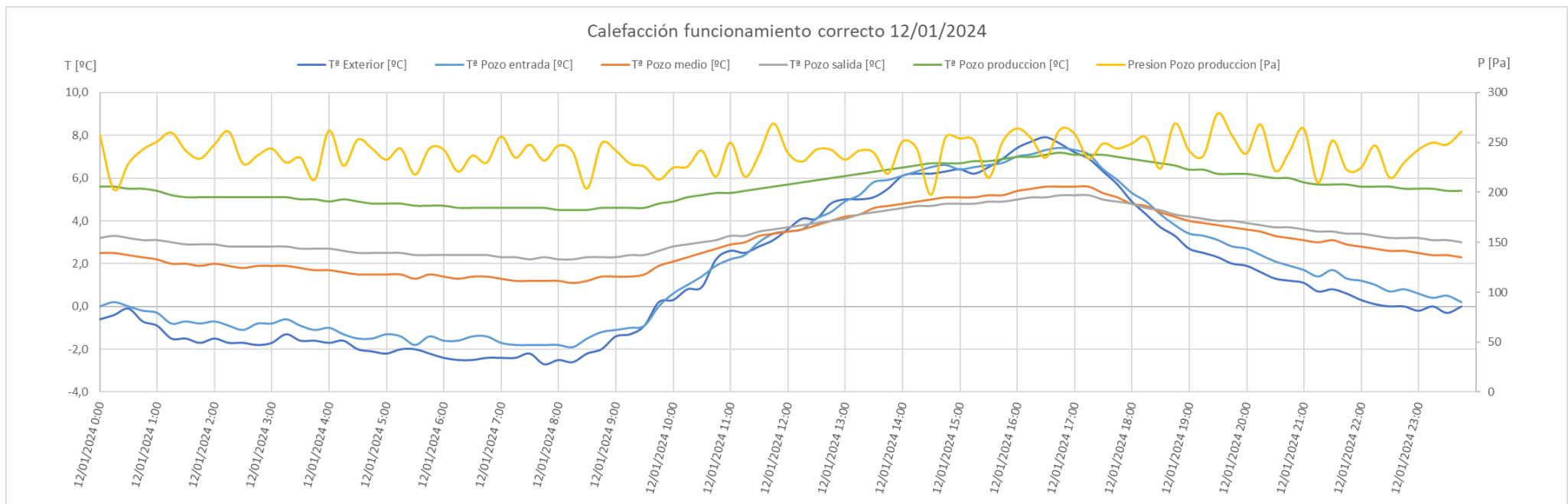
Gráfica 9: Variación de humedad específica a lo largo del primer y del segundo banco de tubos [g vapor/kg aire seco]. Fuente: Elaboración propia.



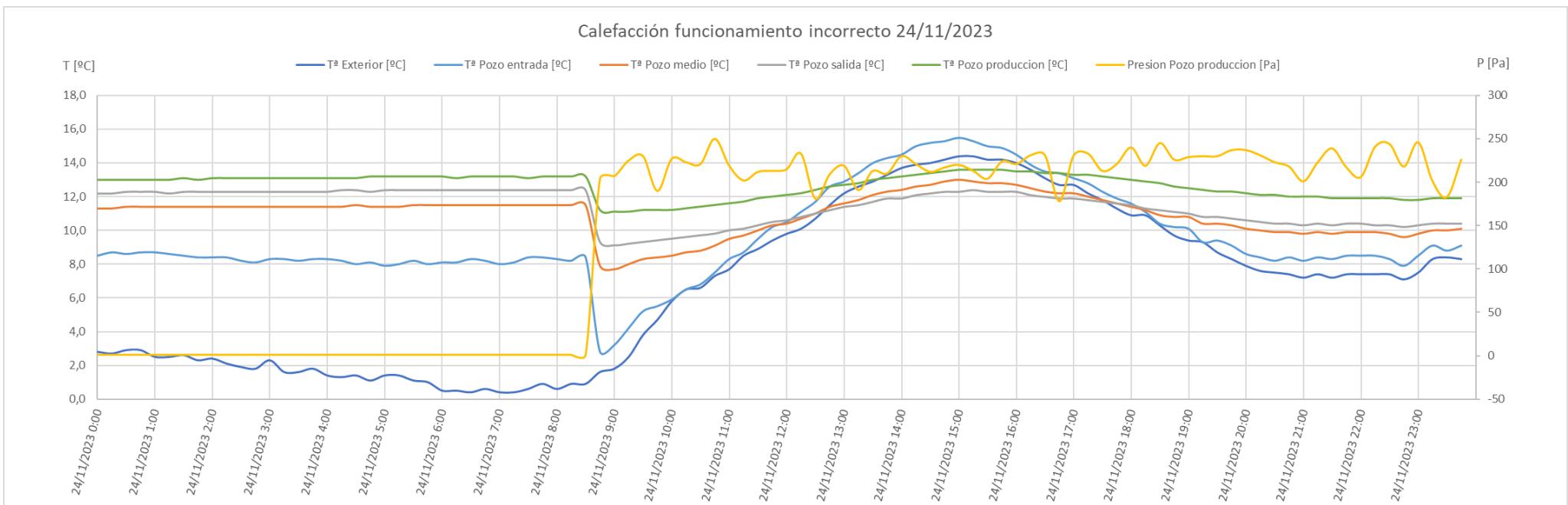
Gráfica 10: Litros condensados de agua en el sistema de pozos canadienses. Fuente: Elaboración propia.



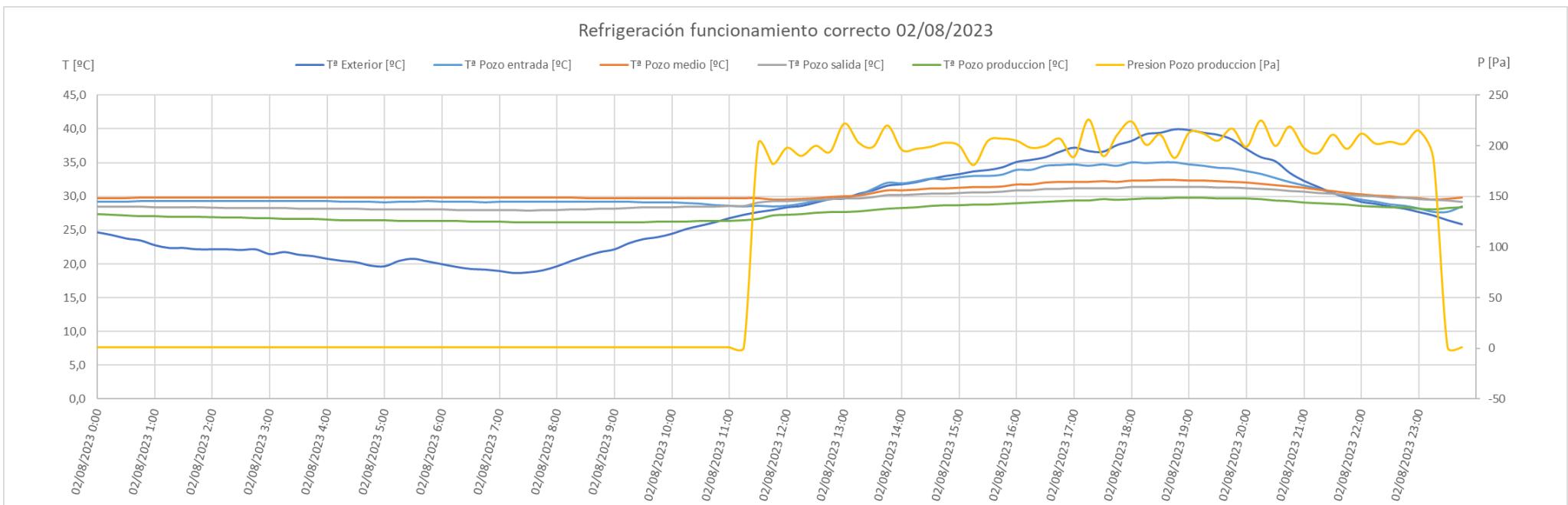
Gráfica 11: Litros condensados de agua por meses en el sistema de pozos canadienses. Fuente: Elaboración propia.



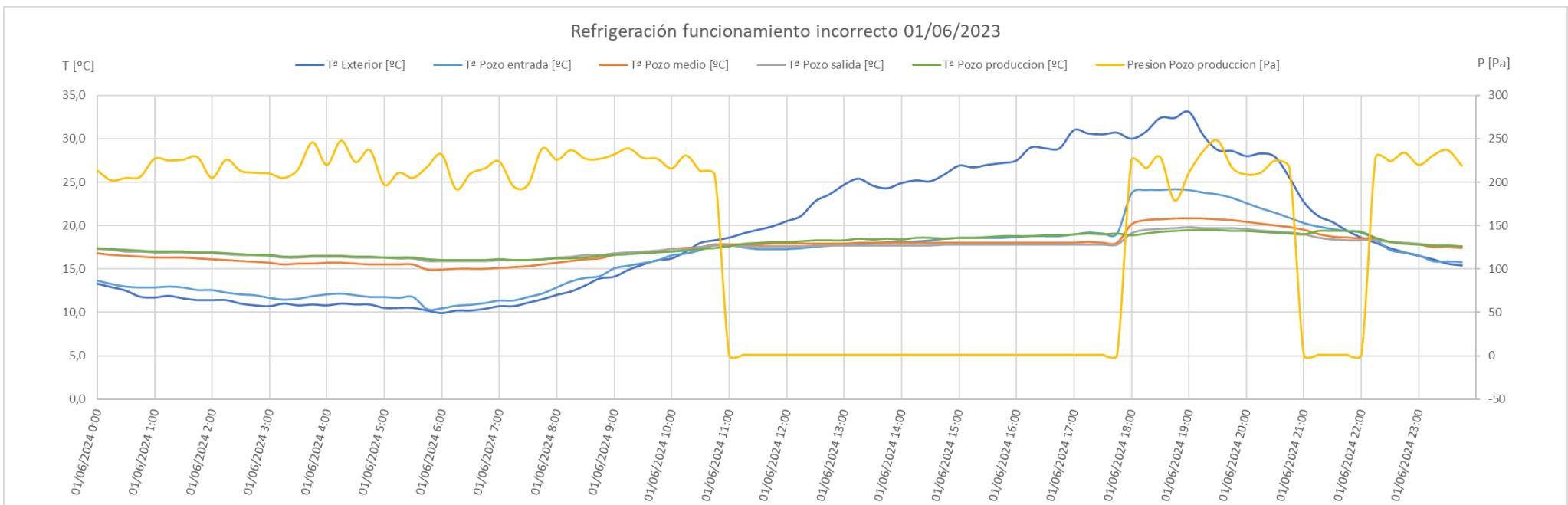
Gráfica 16: Representación de un día tipo en periodo de calefacción funcionando correctamente. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 17: Representación de un día tipo en periodo de calefacción funcionando incorrectamente. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 18: Representación de un día tipo en periodo de refrigeración funcionando correctamente. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 19: Representación de un día tipo en periodo de refrigeración funcionando incorrectamente. Fuente: Elaboración propia.