

# CLIMATIZACIÓN DEL C.I.M AZTERLAN MEDIANTE GEOINTERCAMBIO

I. Arrizabalaga

1 Ente Vasco de la Energía (EVE). Alda. de Urquijo, 36-1º 48011 Bilbao. iarrizabalaga@eve.es

**Resumen:** La nueva sede del Centro de Investigaciones Metalúrgicas Azterlan en Durango, Bizkaia, dispone de una superficie sobre rasante de 3.750 m<sup>2</sup>, en tres plantas. La calefacción y refrigeración del edificio se realiza con una instalación a dos tubos con techos radiantes y una climatizadora agua-aire. La generación térmica se basa en un circuito cerrado vertical de intercambio geotérmico formado por 23 sondeos con una longitud total de perforación de 2.780 m. El intercambiador geotérmico permite el funcionamiento de una bomba de calor agua/agua (enfriadora) de 205 kW de potencia nominal de calefacción y 182 kW de refrigeración. La instalación se halla en funcionamiento desde marzo de 2006 y está cumpliendo con las expectativas existentes. El rendimiento global de la instalación, incluyendo el consumo de la bomba circuladora, es de 3,69 con un elevado nivel de satisfacción de los usuarios. Los principales problemas detectados están relacionados con la parte convencional de la instalación y se centran en el circuito de inversión hidráulica de la instalación. Su solución permitiría alcanzar un rendimiento global superior a 4,20.

**Palabras clave:** geotermia, enfriadora, sondeo, Azterlan.

## 1. INTRODUCCIÓN

El intercambio geotérmico o geointercambio, tecnología desarrollada para el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía (< 25 °C), se emplea desde marzo de 2006 para la calefacción y refrigeración de la nueva sede del Centro de Investigaciones Metalúrgicas de Azterlan. El edificio, con una superficie total climatizada de 3.750 m<sup>2</sup>, está situado en el T.M. de Durango, 30 km al este de Bilbao. El proyecto inicial prevé la instalación en cubierta de dos bombas de calor aire-agua de 200 kW de potencia nominal que alimenten mediante una distribución a dos tubos al sistema de techos radiantes y a la batería de la climatizadora del aire de ventilación.

En diciembre de 2004, con la construcción de edificio avanzada, se inician los trabajos de implantación del sistema de intercambio geotérmico (IG). Las muy escasas referencias en nuestro entorno, de instalaciones de IG con potencias superiores a 100 kW, llevan a plantear una actuación en distintas fases. En todo momento deberá asegurarse la viabilidad técnica y económica del proyecto. Además, el sistema de intercambio geotérmico deberá proporcionar una cobertura significativa de la demanda térmica del edificio. El metodología adoptada para diseñar el circuito consiste en:

- a. Caracterización del terreno
- b. Cálculo de cargas térmicas
- c. Elección de equipos y circuito hidráulico
- d. Dimensionamiento del circuito de IG
- e. Análisis de viabilidad

El resultado obtenido ha permitido abordar la construcción del sistema de intercambio geotérmico. La configuración ejecutada consiste en cubrir la demanda base de calefacción y refrigeración y el 50% de la carga punta con el sistema de IG. Para ello se sustituye una de las bombas de calor del proyecto original por una enfriadora de 205 kW conectada al circuito cerrado. La bomba de calor que se mantiene deberá cubrir las puntas que se produzcan y las situaciones de avería o mantenimiento programado que se puedan producir en el sistema de IG

EVE-CADEM financia el proyecto mediante un programa de ahorros compartidos repercutiendo el coste material de la instalación a Azterlan en los próximos años.

## 2. OBJETIVOS

La instalación de IG de Azterlan tiene un marcado carácter de proyecto demostración. Los principales objetivos que se plantean con su construcción, que en gran medida se están cumpliendo, se pueden resumir en:

- a. Conocer la aplicabilidad de esta tecnología en nuestro entorno. Aunque esta tecnología es sobradamente conocida en el centro y norte de Europa, su uso prioritario es la vivienda unifamiliar y las condiciones climáticas, la tipología de edificación y las condiciones de mercado, incluso socio-económicas y culturales, tienen poco que ver con las de nuestro entorno
- b. Verificar rendimientos. Existe abundante documentación sobre los rendimientos de estas instalaciones especialmente en Norte-América donde la mayoría de los sistemas de climatización basados en IG son agua/aire; la posibilidad de obtener rendimientos estacionales de una instalación agua/agua en nuestro entorno tiene gran un interés
- c. Determinar barreras. Un proyecto de estas características es la mejor manera de hacer aflorar las barreras que puedan existir en nuestro entorno: legales, administrativas, coordinación entre empresas y equipos,...
- d. Evaluar la idoneidad de proveedores. Se trata de conocer la idoneidad de los distintos contratistas para ejecutar las obras según lo especificado y la existencia de suministradores, en un mercado sin desarrollar, de los materiales y equipos necesarios
- e. Obtener costes reales. Es preciso determinar el coste final de una instalación de este tipo con vistas a la definición de posible políticas de promoción y apoyo económico
- f. Comparación frente a tecnología convencional. La coexistencia de los dos sistemas en el mismo edificio permitirá realizar comparaciones sobre los costes, operación y mantenimiento, rendimientos y limitaciones de ambos sistemas.

## 3. DISEÑO DEL CIRCUITO

La viabilidad del proyecto está estrechamente ligada al diseño de circuito que se realice. La definición del circuito a construir requiere el conocimiento detallado de las características del terreno y la determinación de las demandas térmicas de edificio. Una vez dimensionado el circuito se podrán estimar los costes de la instalación, la energía geotérmica que se captará y la reducción del consumo que se obtendrá respecto a un sistema de generación convencional.

### 3.1. Caracterización del terreno

El edificio de Azterlan se emplaza sobre los depósitos aluviales del río Ibaizabal. Se trata de materiales no consolidados básicamente arcillas y gravas con una potencia máxima de 5 m. Es un acuífero con una baja transmisividad debido al escaso espesor de los lentejones de grava. La serie infrayacente está formada por lutitas negras con pasadas de areniscas del Cretácico inferior, Complejo Supraurgoniano. Las características hidrogeológicas generales de estos materiales hacen altamente improbable la captación de recursos de agua subterránea superiores a 1-2 l/s. El circuito debe construirse en el aparcamiento exterior del edificio, una parcela de 70 x 15 m. Por lo tanto, el intercambiador geotérmico será necesariamente un circuito cerrado en sondeos verticales.

Definida la tipología se precisa caracterizar térmica y mecánicamente el terreno. La conductividad térmica de las lutitas saturadas presenta (Kavanaugh & Rafferty, 1997) unos valores comprendidos entre 1,04 y 3,98 W/m/°K, con el 80% de las muestras en valores entre 1,73 y 3,12 W/m/°K. Esta gran dispersión evidencia la necesidad de realizar ensayos adicionales que precisen este valor para poder realizar un dimensionamiento correcto del circuito.

Además y con vistas a la realización de un número importante de metros de perforación es indudable el interés de conocer las características mecánicas del terreno a perforar: profundidad del emboquille, necesidades de revestimiento, aportes de agua, avances, inestabilidades, fracturación, así como los procedimientos de entubación y relleno, con el fin de diseñar correctamente los sondeos y poder estimar los costes.

En marzo de 2005 se ha perforado un sondeo piloto de 120 m de profundidad. En el sondeo se ha instalado un circuito compuesto por dos ramales de tubería de PEAD de  $\varnothing$  40 mm. unidos en la base. También se instala una tubería de acero de  $\varnothing$  1"1/4 con el fin de realizar diagrfías térmicas del sondeo. El anular del sondeo se rellena con una mezcla inyectada de lechada de cemento de dosificación 1:1 y el vertido simultáneo de grava silícea 3-5 mm. Una vez construido el sondeo, transcurrido mas de 15 de días con el fin de asegurar que el sistema recupera las condiciones naturales no influenciadas por la perforación y el calor de fraguado de la lechada ya se ha disipado, se ha realizado una prueba de caracterización térmica del terreno (TRT: *Termal Response Test*). Para ello se ha diseñado y construido un equipo de ensayos con una potencia nominal de 6.000 W. La interpretación de la prueba, empleando el software GPM, proporciona un valor de la conductividad térmica del terreno de 3,1 W/m<sup>°K</sup> en la zona de valores superiores para la litología atravesada. La temperatura del terreno a 80 m de profundidad es de 15,2 °C.

### 3.2. Cálculo de cargas térmicas del edificio y elección de equipos

Las cargas punta del edificio se calculan en el proyecto de la instalación en 360 kW en calefacción y 450 kW en refrigeración. Las demandas térmicas han sido calculadas por el proyectista basándose en datos de consumos reales en edificios de oficinas de características similares. Se estima una demanda de 280.000 kWh en calefacción y algo inferior a 240.000 kWh en refrigeración. La solución elegida cubre el 50% de la carga punta con el sistema geotérmico. El 50% restante se cubrirá manteniendo una de las dos bombas de calor originales a instalar en la cubierta del edificio. Se estudia la oferta de los distintos fabricantes europeos y norteamericanos de bombas de calor glicol/agua (enfriadoras). La oferta de equipos reversibles se limita a una potencia máxima de 100 kW. Además, la mayoría de los fabricantes de bombas de calor para aplicaciones geotérmicas fabrica equipos glicol/aire o glicol/agua para climas con demandas de refrigeración muy reducidas y no prevén la refrigeración activa. La mayoría de los grandes fabricantes tienen bien cubierta la gama de potencias superiores a 300 kW, con modelos con compresor de tornillo de gran eficiencia. Sin embargo, el tramo de potencias de 100 a 300 kW presenta lagunas y los modelos en catálogo ofrecen COPs relativamente bajos, inferiores a 3,5. Finalmente, se elige una enfriadora comercial de la casa Ciatesa modelo LG600V con 4 compresores *Scroll* y 4 etapas, con un buen grado de parcialización. La potencia en modo calefacción para las condiciones de trabajo previstas: 45°C/5°C (T<sup>a</sup> salida condensador/T<sup>a</sup> salida evaporador) es de 205 kW, con un COP de 4,3. En refrigeración, a 30°C/7°C, la potencia de catálogo es de 182 kW, con un EER de 5,4.

El cálculo del circuito se ha realizado con el software GS2000 de la empresa canadiense Caneta. Se ha supuesto que el circuito cubre la totalidad de la energía demandada por la climatización del edificio y el 50% de la carga punta. La longitud de circuito calculada es de 2700 m de perforación. De acuerdo con la superficie disponible se proyectan 22 sondeos de 125 m de profundidad que junto al sondeo piloto completarán el metraje necesario con el margen de seguridad preciso.

### 3.2. Análisis de viabilidad

Una vez que se han establecido los costes de perforación y elegido una enfriadora se plantea la viabilidad económica del sistema proyectado mediante un análisis mes a mes entre los costes de explotación de la alternativa de generación convencional y la alternativa geotérmica. Las principales magnitudes, con los costes finales de la obra ya ejecutada, se presentan en la tabla 1.

Tabla I. Resumen del Análisis de viabilidad de la instalación.

<i>Concepto</i>	<i>Calefacción</i>	<i>Refrigeración</i>
Carga térmica del edificio (kWh)	278.551	236.747
Consumo energía eléctrica bomba de calor aire/agua (kWh)	112.319	83.069
Consumo energía eléctrica enfriadora agua/agua (kWh)	65.541	53.806
Energía térmica captada o disipada en el terreno (kWh)	213.010	-290.553
Reducción consumo IG vs óptimo convencional (kWh)	-46.778	-29.263
Ahorro (€/año; coste energía eléctrica 2005: 120 € MWh)	-5.613	-3.512
Sobre-inversión frente a instalación convencional (€):		
Sondeos (60,6%)		
Conducciones y obra civil (13,2%)		
Colectores y Grupo hidráulico (9,0%)		176.123,76
Enfriadora (10,0%)		
Electricidad y control (7,2%)		
Bomba de calor 220 kW no instalada	-40.000	
Subvención energía renovable (€)	-35.200	
Reducción coste mantenimiento (€/año)	1.500	
<i>Pay-back</i> (años)	9,5	

El período de retorno bruto de la inversión es de 9,5 años a coste eléctrico del año 2005. Un incremento en la tarifa del 10% representa una reducción del *Pay-Back* de 0,8 años. Teniendo en cuenta que la vida mínima estimada para el circuito de intercambio geotérmico es de 50 años, y que una enfriadora tiene una vida superior y un coste de reposición inferior a una bomba de calor aire/agua, se decide construir la instalación.

#### 4. CONSTRUCCIÓN

La construcción de los sondeos del circuito geotérmico se inicia el 6 de junio de 2005. La perforación, por la empresa Perforaciones Jocal, se ha realizado a rotoperusión con martillo en fondo (figura 1) con una perforadora Tamrock, modelo Drilltech25. La progresión obtenida ha sido de 4 sondeos/semana, incluyendo traslados entre puntos y las labores de perforación, entubación y relleno del anular. En perforación se han obtenido avances medios superiores a 20 m/h. Todos los sondeos se han perforado a  $\varnothing$  165 mm excepto los 6 m superiores que se han revestido con tubería de acero de emboquille de  $\varnothing$  180 mm. Se han experimentado distintos esquemas constructivos de los sondeos con el fin de que la monitorización prevista permita determinar las posibles diferencias entre las mismas y extraer conclusiones para próximas instalaciones. Para ello se han utilizado varios tipos de tuberías de PE, espaciadores, materiales de relleno y número de circuitos en cada sondeo. En la tabla 2 se resumen las características de cada variante y el número de sondeos en el que se ha ensayado.

Tabla II. Variantes empleadas en la construcción del circuito de IG de Azterlan

<i>Elemento</i>	<i>Variantes utilizadas</i>	<i>Nº sondeos</i>
Tubería	PE100 ø 40 x 3,7 mm PN16	18
	PE100 ø 40 x 3,0 mm PN12,5 (tri-tubo)	4
	PE100 ø 40 x 2,4 mm PN10	1
Espaciadores	No	5
	20 mm	14
	60 mm	4
Relleno anular	Agua	1
	Lechada de cemento 1:1 + gravilla silícea 2- 5 mm	2
	Gravilla silícea 2-5 mm	8
	Gravilla silícea-carbonatada 2-5 mm	12
Nº circuito/sondeo	1	20
	2	3

Figura 1. *Labores de entubación del sondeo Azt-12*

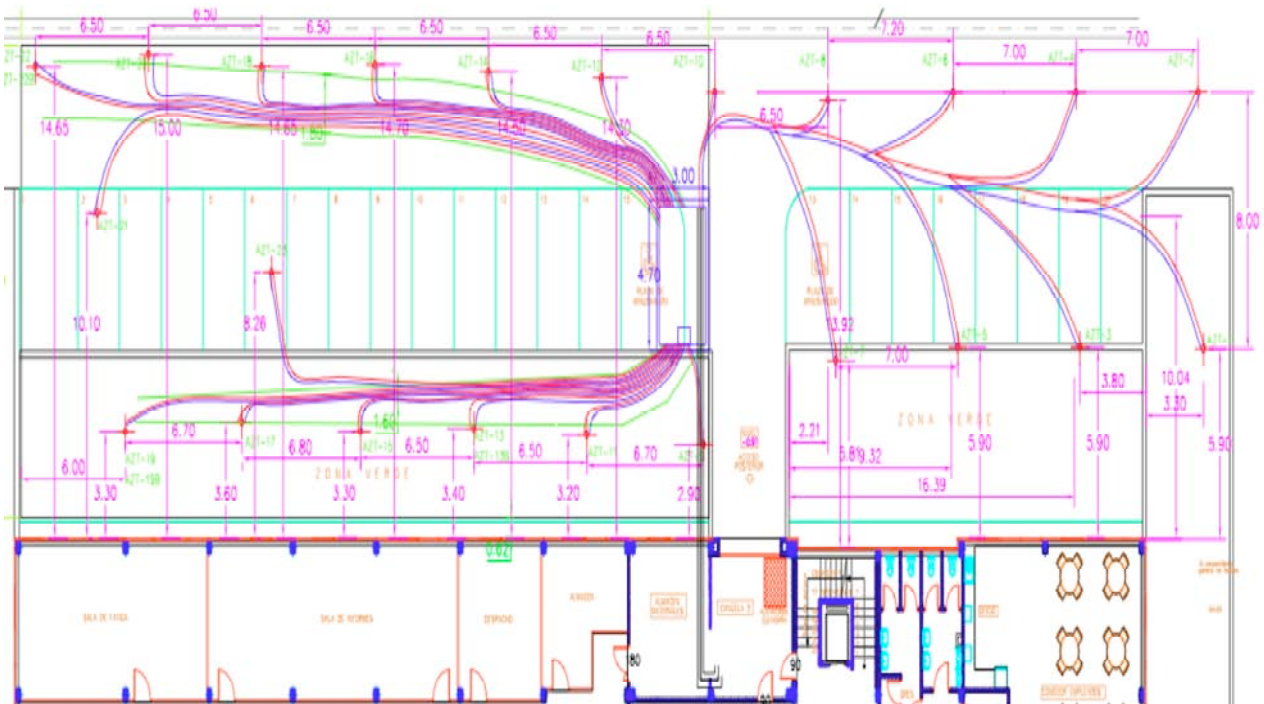


Se ha inyectado el anular de los sondeos entre los metros -1 y -6 con mortero de cemento con arena silícea 1:3, con el fin de sellar el acuífero aluvial superficial.

Con el fin de facilitar la monitorización de los 26 circuitos y reducir las servidumbre

s en la parcela de aparcamiento los sondeos se han conectado en paralelo a los colectores de impulsión y retorno. Los colectores de distribución se han emplazado en una posición central, (fig. 1) para equilibrar las pérdidas de carga entre los distintos circuitos, y en las proximidades del edificio. Las zanjas para las conducciones tienen una profundidad mínima de 1,20 m y una ligera pendiente, 1%, hacia los sondeos con el fin de evitar la acumulación de aire en el circuito. El perfil consta de una cama de 10 cm de arena caliza sobre los que se disponen las conducciones de PEAD ø 40 mm PN10. Las tuberías se protegen con 10 cm de arena y el relleno hasta rasante se realiza con el material de la propia excavación. Todas las uniones se han realizado mediante soldadura *socket* y se ha realizado una prueba hidráulica de todos los circuitos a presión de red: 4,5 Bar, previa al cerrado de la zanja.

Figura 2. Plano *As-built* con la situación de los sondeos y las conducciones



El proyecto original de armario registro en superficie se ha modificado, para eliminar cualquier servidumbre en el aparcamiento, construyendo una cámara subterránea de colectores, construida en hormigón armado, donde se ha montado la valvulería para el seccionamiento de los circuitos, purgadores y la instrumentación de control adecuada para la monitorización de los circuitos: 1 contador volumétrico con emisor de impulsos: 1L/1P, y una sonda de temperatura NTC en el retorno de cada circuito. La temperatura de impulsión es la misma para todos los circuitos y se controla en el cuarto mecánico.

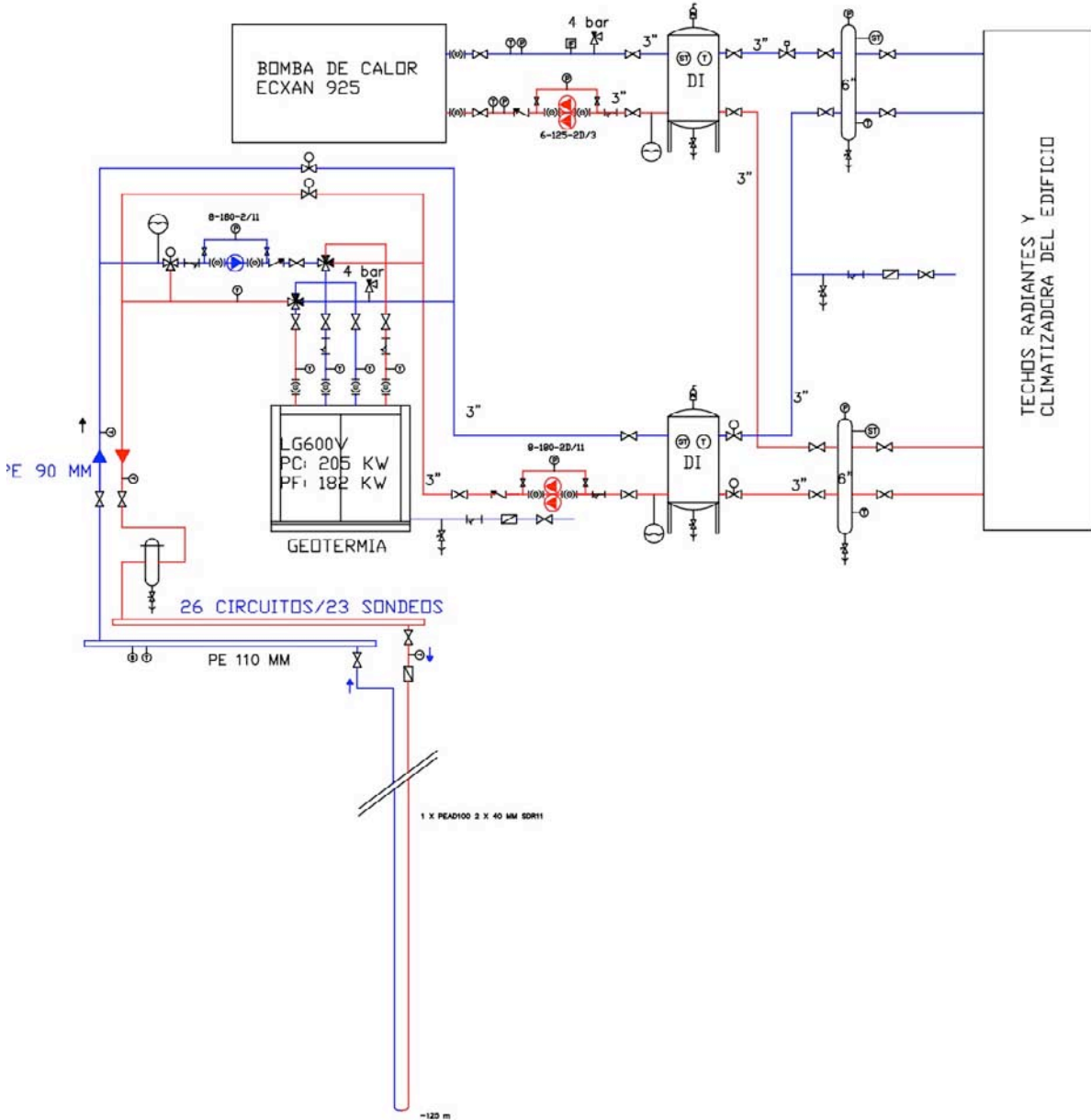
El cuarto mecánico, en el sótano, esta conectado con la cámara de colectores con dos tuberías de PEAD de  $\varnothing$  90 mm. El acceso se verifica a través de dos pasamuros sellados para evitar posibles filtraciones de agua. En paralelo se ha dispuesto una tubería de canalización eléctrica para los cables de señal para la monitorización.

En el cuarto mecánico se ha emplazado la enfriadora del circuito geotérmico, la bomba circuladora, el circuito de inversión hidráulica, basado en 2 válvulas de 4 vías, y el cuadro eléctrico con el variador de frecuencia que acciona la bomba circuladora primaria. Se han instalado dos circuitos de *by-pass* con sendas válvulas motorizadas para la refrigeración del edificio mediante disipación directa en el terreno: refrigeración pasiva o *geocooling*.

En el cuarto mecánico se emplazan las subcentrales para la monitorización de los circuitos geotérmicos y su conexión con el ordenador de control central del edificio. La generación de la enfriadora, y de la bomba de calor de cubierta, están monitorizadas mediante sendos contadores volumétricos con salida de impulsos y pares de sondas PT100 para el control de las temperaturas de impulsión y retorno a los depósitos de inercia. Además, el sistema Metasys de control central registra, entre otras variables, la potencia absorbida y el consumo energético de todos los equipos situados en el cuarto de geotermia: básicamente la enfriadora y la bomba circuladora primaria (figura 3).



Figura 3. Detalle del esquema de principio de la instalación de climatización de Azterlan

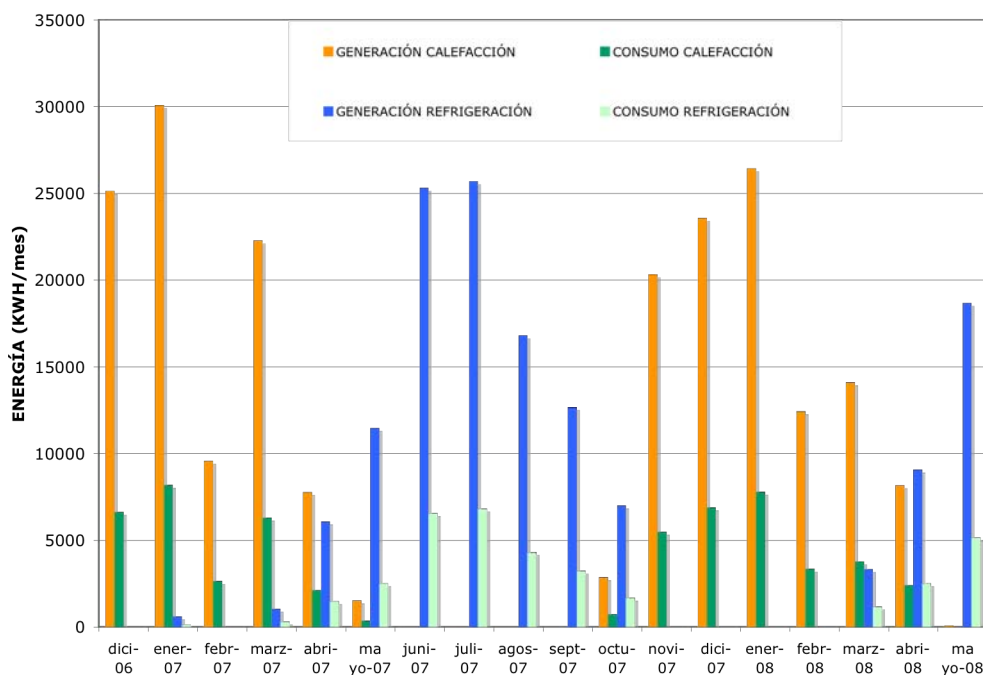


## 5. FUNCIONAMIENTO

La instalación de climatización comienza a funcionar en marzo de 2006, con el traslado de Azterlan al nuevo edificio, aunque el ordenador de control central no se coloca hasta diciembre de 2006. El funcionamiento del sistema de intercambio geotérmico está cumpliendo con las expectativas existentes con elevados rendimientos y un nivel de confort destacado por los usuarios. En la figura 4 se resume el funcionamiento en este período.

Se utiliza agua como fluido de intercambio y hasta la fecha no ha sido preciso glicolarla. La temperatura de salida del evaporador se mantiene normalmente por encima de 7 °C. Cuando la temperatura baja de este umbral el variador de frecuencia incrementa el caudal circulante en el terreno y el evaporador reduciéndose la diferencia de temperatura entre impulsión y retorno.

Figura 4. Sistema de geointercambio de Azterlan Energía térmica generada y energía eléctrica consumida



El sistema de refrigeración pasiva (geocooling) permite la disipación en el terreno de cargas parciales, 60 kW, del edificio. Aunque su utilización se limita a determinados períodos permite alcanzar, cuando se aplica, valores del EER superiores a 15.

La puesta en marcha ha sido relativamente laboriosa y se han solucionado diversos problemas relacionados principalmente con elementos electro-mecánicos o de control de la parte convencional de la instalación. Estos problemas han ocasionado una merma en el rendimiento de la instalación que, indudablemente, ha quedado reflejada en los registros de este período, pero la mayoría han sido solucionados en un plazo de tiempo mas o menos breve. El dispositivo de inversión hidráulica elegido merece una especial atención por los problemas que todavía está ocasionando y por la afcción al rendimiento global del sistema de geointercambio.

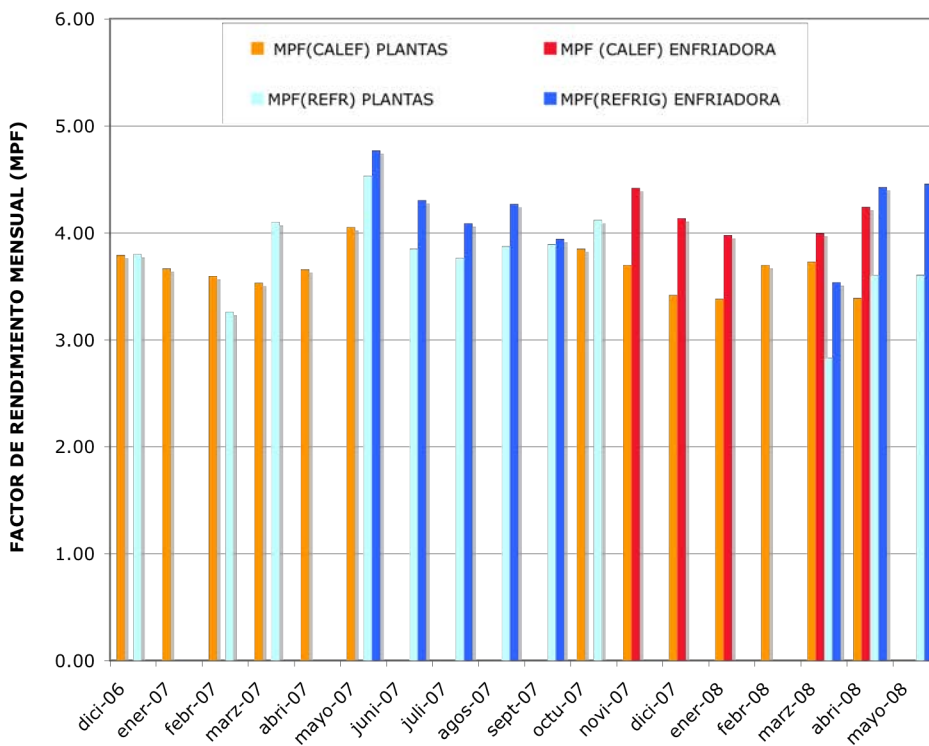
El sistema de inversión, montado según la recomendación habitual de los fabricantes para estas enfriadoras, se basa en dos válvulas de 4 vías accionadas por sendos servomotores. Su función es la de posicionar las clapetas de las válvulas para el funcionamiento de la generación en modo calefacción o modo refrigeración. De este modo, se deriva el circuito del condensador al edificio en calefacción y al terreno en refrigeración y se procede de modo inverso con el circuito del evaporador. Aunque la estanqueidad de estas válvulas no es completa las especificaciones del fabricante limitan la fuga a un máximo del 1,5 % del caudal circulante. Sin embargo, en el circuito de Azterlan donde existen desequilibrios de presiones entre el circuito primario y secundario se están midiendo fugas térmicas por estas válvulas de hasta el 20%. Estas fugas se han observado desde el inicio del funcionamiento incrementándose su seguimiento hasta ahora. En mayo de 2007 se inicia la monitorización de la entrada y la salida al evaporador y en noviembre se cambia al condensador. Desde abril de 2008 se han monitorizado las salidas y entradas al evaporador y al condensador en la misma enfriadora. El cálculo del rendimiento mensual en calefacción y refrigeración se presenta en la figura 5. El término de consumo eléctrico engloba todos los consumos de los elementos situados en el cuarto mecánico: enfriadora, bomba circuladora primario, accionamientos: variador de frecuencia, servos, válvula mezcladora, alimentación sensores y subcentrales,....

La energía térmica generada en la enfriadora sufre una pérdida importante en las válvulas de 4 vías. El registro, en el mismo cuarto mecánico, de la temperatura de impulsión y de retorno al depósito



de inercia (plantas) revela una reducción media del 13% en calefacción y del 10,3% en refrigeración.

Figura 5. Comparación de la evolución de los coeficientes de rendimiento mensual de la enfriadora y enviado a plantas



El tratamiento del período de monitorización comprendido entre diciembre de 2006 y mayo de 2008 se sintetiza en la tabla III. El APF (*Annual Performance Factor*) obtenido es de 3,69 si se considera el registro de la producción en las conducciones a plantas. Este valor se encuentra condicionado por las actuaciones derivadas de la puesta en marcha de la instalación, las modificaciones que se han hecho en el primer año de funcionamiento y especialmente las fugas observadas en las válvulas inversoras. Las mediciones de la producción bruta del sistema de IG, antes de estas fugas, que se están realizando en paralelo elevan el APF a 4,21, que debería considerarse el objetivo a conseguir en esta instalación.

Tabla III. Resumen de los rendimiento obtenidos en el instalación de IG de Azterlan

	PLANTAS	ENFRIADORA
SPF <sub>calefacción</sub>	3,60	4,14
SPF <sub>refrigeración</sub>	3,82	4,26
APF	3,69	4,21

## 6. CONCLUSIONES

El proyecto de climatización mediante intercambio geotérmico del edificio de Azterlan ha cubierto la mayor parte de los objetivos previstos. La instalación se ha diseñado y construido por organismos y empresas locales y se encuentra en funcionamiento desde marzo de 2006 con un comportamiento más que aceptable. La perforación de un sondeo piloto y de un ensayo TRT han demostrado ser indispensables para el dimensionamiento correcto del circuito. Se estima que su realización debería ser obligatoria para el diseño de instalaciones de intercambio geotérmico de más de 30 kW. El sondeo piloto ha permitido también que los costes de ejecución de la instalación se hayan ajustado a lo proyectado. Resultan altamente competitivos, dada la previsible evolución de los precios energéticos, especialmente respecto a otras energías renovables. Los ratios obtenidos por kW instalado son de 859 €/kW de potencia calefactora y 967,7 €/kW respecto a la potencia geotérmica captada. Las costes de mantenimiento de la enfriadora y del circuito de IG son mínimos. El circuito hidráulico de inversión, por el contrario, está requiriendo mayores atenciones.

El rendimiento de la instalación en estos dos años, APF (*Annual Performance Factor*): 3,69, es ligeramente inferior a los valores considerados en el análisis de viabilidad. El funcionamiento de la instalación se encuentra penalizado por un mal comportamiento de algunos elementos ajenos al propio sistema geotérmico. Así, se considera perfectamente posible alcanzar un valor del APF superior a 4,2, siempre que se asegure la desconexión hidráulica entre los circuitos de condensación y evaporación. El diseño de la distribución a 4 tubos en vez de 2 hubiera solucionado este problema proporcionando valores del APF superiores a 6.

En los próximos meses deberá optimizarse el funcionamiento del circuito de *by-pass* que permite el *geocooling* con cargas parciales de hasta 60 kW y conectar la refrigeración de una serie de equipos de ensayo, en la actualidad con una enfriadora dedicada, al circuito geotérmico.

El único objetivo del proyecto que no se ha alcanzado hasta la fecha ha sido la comparación con la tecnología aire/agua. Hasta el momento, debido a las condiciones climáticas moderadas de los últimos dos años, el sistema geotérmico cubre la práctica totalidad de las necesidades térmicas del edificio. Los arranques de la bomba de calor auxiliar han sido ocasionales y relacionados con trabajos de mantenimiento en el sistema de climatización y ventilación del edificio.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Este artículo se ha redactado dentro de las acciones de divulgación del proyecto Astech (*Advanced Sustainable Energy Technologies for Cooling and Heating applications*), financiado por el 6º Programa Marco de la UE.

## 8. REFERENCIAS

CANETA RESEARCH INC 1995. "Comercial/Institutional Ground-Source Heat Pump Engineering Manual". ASHRAE

CIATESA, Características técnicas de las unidades enfriadoras Dynaciat LG

KAVANAUGH, S. P. & RAFFERTY, K. 1997. "Ground-Source Heat Pumps Design of Geothermal Systems For Commercial and Institutional Buildings". ASHRAE

McCRAEY, K. (ED) 1999. "Guidelines for the Construction of Vertical Boreholes for Closed Loop Heat Pump Systems". National Ground Water Association-Geoexchange