

Análisis de usos energéticos de recursos geotérmicos en el Sistema Acuífero Guaraní

Primer Informe

Autor: José Cataldo

Fecha: Abril, 2006

Índice

1 - Antecedentes

2 - Recurso energético

3 – Utilización del recurso geotérmico

4 - Actividades industriales y domésticas que requieren energía

5 - Fuentes de energía alternativa en la región

5.1-Aspectos Generales

5.2-Fuentes de energía renovable disponibles

6 - Posibilidades de utilización de la energía geotérmica en la región.

7- Bibliografía

1 - Antecedentes

El conocido diagrama de Lindel, propuesto en 1973, y sus posteriores modificaciones muestra la experiencia en el uso de energía geotérmica en el mundo. Este diagrama consigna las diferentes aplicaciones del recurso energético geotérmico, en función de la temperatura a la cual se dispone el agua que se extrae del pozo geotermal. Una imagen del mencionado diagrama se presenta en la figura 1.1. La Oficina de Educación Geotérmica de California (GEO), en colaboración con el GeoHeat Center (GHC) del Instituto Tecnológico de Oregon elaboró un panel sobre usos de la energía geotérmica inspirado en el diagrama de Baldur Lindal oriundo de Islandia el cual se puede encontrar en GEO, julio/agosto,2005.

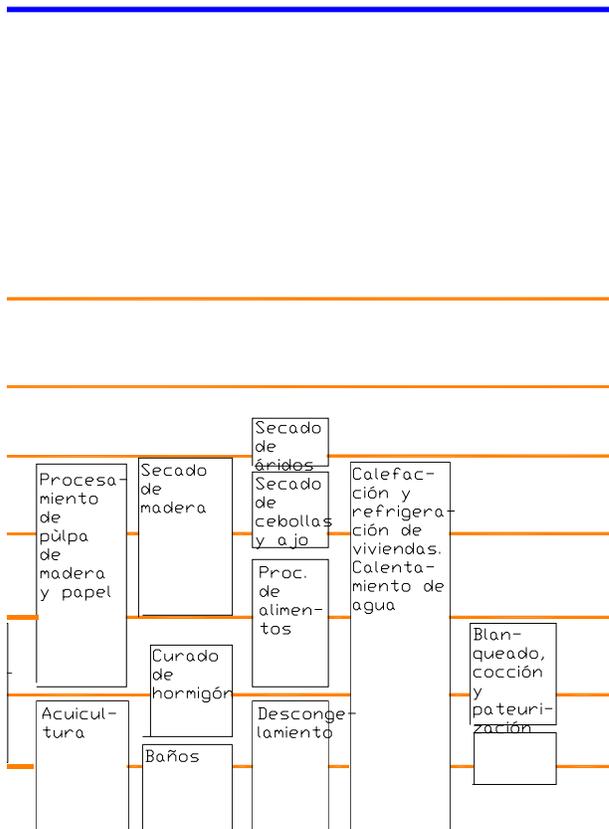


Figura 1.1 – Diagrama de Lindal modificado.

Se destaca que para recursos geotermales en donde el agua se tiene a 40°C se registran usos tales como calentamiento de piscinas, calentamiento de agua en el sector residencial, alimentación de bombas de calor, calefacción y crianza de animales. Para recursos con temperatura en el orden de los 80°C aparecen procesos tales como secado, digestión de fangos, refrigeración, lavado de lana, fraguado de bloques de hormigón y digestión de

barros. Para temperaturas mayores a 100°C se destaca la generación de energía eléctrica a partir de ciclos binarios, es decir, ciclos que manejan fluidos intermedios; o bien de planta convencionales, cuando la temperatura es mayor a 150°C.

En la página web del GHC (<http://www.oti/ghc>) se presenta un amplio conjunto de ejemplos de aplicación de la energía geotérmica.

La energía térmica disponible en la Tierra, respecto a un nivel de referencia de 15°C, se estima en 12.6×10^{24} MJ, de acuerdo a lo planteado por Armstead, 1983, de los cuales 5.4×10^{21} MJ se localizan en la corteza terrestre. Si bien la energía térmica resulta muy importante sólo una porción de la misma sería aprovechable, entre la que se destaca el recurso geotérmico.

Si bien se tienen referencias del uso de la energía geotérmica ya en el siglo XIX, su principal desarrollo se registró en el siglo XX. Entre los usos no termales del recurso geotérmico puede identificarse dos grandes grupos de usos energéticos de los mismos, como lo son los usos térmicos y los usos destinados a la generación de energía eléctrica. El antecedente más destacado de uso energético del recurso geotermal resulta la explotación llevada a cabo en Italia por parte de Francesco Larderell hacia el año 1827. Dicha experiencia se orientó a la aplicación del recurso geotermal en una aplicación industrial donde se requería calor para evaporar un líquido. Entre 1850 y 1875, en el mismo sitio, se registra la primera utilización del recurso geotérmico con el objeto de generar energía eléctrica. En el año 2003 la potencia geotérmica instalada en el mundo destinada a la generación de energía eléctrica era de 8492MW. En cuanto a la potencia geotermal instalada para usos térmicos, en el año 2001, ascendía a 15145MW. En ambas modalidades de utilización se destaca la presencia de los Estados Unidos con una participación aproximada del 25%.

2 - Recurso geotérmico

La energía geotérmica es la energía térmica almacenada en las rocas y fluidos que llenan las fracturas y poros de dichas rocas, ubicadas por debajo de la superficie de la Tierra tal como se plantea en el sitio web del Geothermal Resource Council (<http://www.geothermal.org/what.html>) o en Geo-Heat Center del Instituto Tecnológico de Oregon (<http://www.geohat.oit.edu/whatgeo.htm>). Esta energía térmica proviene, principalmente, del decaimiento de los isótopos de larga vida de elementos tales como uranio, thorio y potasio, así como de calor transferido de las zonas de la Tierra a mayor temperatura como lo es el Núcleo.

A profundidades alcanzables con la tecnología disponible, que resultan del orden de 10.000m, se tienen gradientes de temperatura de entre 25°C/km y 30°C/km. Este parámetro es altamente variable, registrándose zonas con gradientes de 1°C/km y zonas geotermiales con gradientes de 250°C/km.

Como se señala en Dickson and Fanelli, 2004, los sistemas geotérmicos se componen básicamente de tres elementos principales: una fuente de calor, un reservorio geotérmico constituido por un volumen de rocas y un fluido.

La fuente de calor puede ser o bien una intrusión magmática de elevada temperatura o bien del tipo radiogénica. El calor es transmitido por conducción a las rocas que rodean la fuente. La temperatura de las rocas o en rigor el gradiente térmico que se establece en la profundidad depende de la fuente de calor.

El reservorio serían las rocas que se encuentran a elevadas temperaturas. En general esas rocas a elevada temperatura presentan poros y fracturas por donde circula el fluido geotérmico.

El fluido geotérmico suele ser agua, la cual fluye desde zonas de recarga, donde estas rocas se encuentran expuestas al ambiente, hacia zonas profundas que son cubiertas por capas impermeables. Estas rocas suelen estar cubiertas por rocas impermeables que permiten que el agua meteórica sustituya el fluido geotérmico que es extraído o que fluye al exterior. Como consecuencia del intercambio térmico entre el fluido y las rocas a elevada temperatura, el fluido geotérmico presente una cierta temperatura y un cierto nivel de presión, asociado a la diferencia de cota entre la zona de recarga y el sitio donde se explotará. El recurso geotérmico presentará entonces un cierto nivel entálpico respecto a las condiciones existentes en la superficie local.

Es posible identificar diferentes categorías de recursos geotérmicos, como son:

- **Recurso en puntos ígneos** – Está asociado al movimiento de masas de magma. En este caso el magma transmite calor a las rocas circundantes y que se encuentran por encima, y de estas principalmente por conducción al fluido geotérmico.
- **Circulación por convección desde zonas profundas en áreas de elevada flujo de calor** – En este tipo de recurso, también denominados sistemas de convección hidrotérmica, el fluido geotérmico presenta movimientos convectivos entre zonas profundas a elevada temperatura y zonas a menores temperatura cercanas a la superficie
- **Recursos presurizados** – En este caso entre los fluidos geotermales se tiene gases mezclados y disueltos como metano, ocupando estratos sedimentarios a presiones del orden de los 700kg/cm^2 , siendo usuales en la costa del Golfo de México.
- **Recursos radiogénicos** – El fluido geotérmico se encuentra en rocas que son ricas en uranio y torio, siendo mayor el flujo de calor desde estos elementos que por conducción desde las rocas sedimentarias.
- **Acuíferos profundos en área de gradiente normal** – El agua a elevada temperatura se encuentra en cuencas profundas, porosas que permiten el flujo de fluido geotérmico a profundidades comercialmente explotables.

El aprovechamiento del potencial energético disponible en los sistemas geotérmicos se efectúa a través de diversas formas, como se verá en el capítulo siguiente, lo cual será dependiente de las características físicas del mismo. Debe ser destacado entre tales

características la energía disponible caracterizada por la temperatura del reservorio, el gradiente de temperatura en la profundidad, la presión en el reservorio, su profundidad y las características mecánicas y termodinámicas del suelo.

A los efectos de estimar la energía disponible a nivel del suelo, en el sitio de explotación, así como el tipo de utilización no se ha encontrado una metodología rigurosa específica, utilizándose las metodologías disponibles en otras áreas temáticas. Esta constatación posiblemente es debido a que no existe un uso específico del recurso geotérmico sino que el mismo se utiliza como fuente de energía para usos convencionales. Se puede hablar de recursos dominados por el vapor, en general los que presentan mayor temperatura, y por otros recursos dominados por el líquido, dependiendo del estado en el cual se encuentra el fluido geotérmico. Si bien, las diferentes referencias mencionan los niveles entálpicos, los diferentes recursos suelen clasificarse de acuerdo a la temperatura que se encuentra el fluido geotérmico. En la tabla 1 se presentan clasificaciones de los recursos geotérmicos propuesta por distintos autores. Si bien en la tabla se habla de nivel entálpico, la clasificación se hace en base a la temperatura del fluido geotérmico. La entalpía de una sustancia líquida, como el agua, depende de la temperatura y de la presión del fluido. A partir de la observación de la curvas de estado, se deduce que la entalpía del líquido subenfriado resulta prácticamente independientemente de la presión. A modo de ejemplo, el agua en fase líquida a una presión de 1kg/cm^2 y 90°C de temperatura presenta una entalpía de 90kcal/kg , mientras que para una presión de 30kg/cm^2 y 90°C la entalpía del líquido subenfriado es de 90.5kcal/kg . Por otro lado, para vapor sobre calentado ocurre algo similar. Para una temperatura de 300°C , a 1kg/cm^2 la entalpía resulta de 734 kcal/kg , mientras que a 30kg/cm^2 la entalpía es de 720kcal/kg . En caso que el recurso geotérmico sea de base líquida o de base vapor la temperatura resulta una adecuada medida del nivel de entalpía.

Autor	Buffer y Cataldi	Hochstein	Benderritter and Comy	Nicholson	Axelsson and Gunnlaugsson
Recurso de baja entalpía	< 90	< 125	< 100	≤ 150	≤ 190
Recurso de entalpía intermedia	90 – 150	125 – 225	100 – 200	-----	-----
Recurso de alta entalpía	> 150	> 225	> 200	> 150	> 190

Tabla 1 – Clasificación de los recursos geotérmicos.

Ahora bien, lo usual es que en un sitio dado se tenga un gradiente de temperatura en la profundidad como se mencionaba antes. En los casos en que exista circulación convectiva del fluido geotérmico entre zonas profundas a elevadas temperaturas y zonas someras a bajas temperaturas, hay una tendencia a producirse una uniformización del campo de temperatura para profundidades mayores de entre 250m y 1000m. Esto lleva a que, en caso de tenerse estos movimientos convectivos, el nivel de energía disponible cambiaría con la profundidad, incluso en la zona de **saturación** , es decir donde el fluido geotérmico llena los

poros y las fracturas. En la una unidad geológica que es capaz de proveer una cantidad de agua suficiente para fines prácticos, identificado como acuífero, presenta un **nivel de agua estático**, que es el nivel que adopta el agua en el pozo sin realizar bombeo desde el mismo y un **nivel de agua bajo bombeo**, que depende del caudal que se extrae del pozo, siendo la diferencia entre la cota del nivel estático y la cota del nivel bajo bombeo la **depresión**. Entre la cota de la superficie libre que se establece y el fondo del pozo se tiene un gradiente de temperatura como antes se mencionara. En caso que este gradiente sea muy importante, a los efectos de hacer factible su explotación, se puede disponer una tubería, que se describirá más adelante, con un conjunto de perforaciones que promueva los movimientos convectivos dentro del pozo de extracción del fluido geotermal y así lograr una uniformización del campo de temperatura en todo el pozo. El **caudal específico** es el cociente entre el caudal bombeado y la depresión. Obsérvese que si bien este parámetro depende de las características del recurso, en la medida que se logre una uniformización del campo de temperaturas se podría ubicar la bomba a menores profundidades.

La especificación y dimensionamiento de un pozo destinado a la utilización del recurso geotermal dependerá, por un lado, de los requerimientos que impone la utilización como son la temperatura, la presión y el caudal del fluido geotermal que se utilice y, por otro lado, de aspectos vinculados a las características del suelo y del tipo de explotación que se desea realizar. En Rafferty, 2001 se hace un buen resumen de los elementos que hacen a la especificación del pozo. Entre los principales aspectos se destacan: 1 – **aspectos no técnicos** como requerimientos en cuanto a la calificación de la empresa a contratar, una descripción del sitio, el control del ruido, descubrimientos arqueológicos e instalaciones que proveerá el propietario, 2 – **requerimiento de los equipos** necesarios para hacer la perforación, 3 – **el fluido a utilizar en la perforación**, 4 – **muestreo** de los materiales que se encuentran durante la perforación, elementos de singular importancia en el diseño de la eventual malla a través de la cual succionará la bomba y la grava que actuará como sostén del material que constituye la pared del pozo y también como filtro, 5 – **registros** a efectuar durante la perforación como ser características físicas de las diferentes capas atravesadas, nivel estático del agua dentro del pozo, distribución de temperatura en la profundidad, 6 – **camisa** requerida para estabilizar el material que constituye la pared del tubo y apoyar el material de sellado del pozo, 7 – la **malla** permite el filtrado del fluido debiendo especificarse la apertura de la malla, método de instalación, diámetro y longitud, tendiéndose en cuenta el resultado de los ensayos de tamizado y las pérdidas de carga admisibles, 8 – la **grava** que se suele disponer por fuera del filtro sirve tanto para sostener el material que constituye la pared del pozo y apoyar en el filtrado, 9 – las **muestras de agua** son importantes a los efectos de conocer lo abrasivo y corrosivo que puede ser el fluido geotermal, para lo cual es necesario evaluar la calidad del agua se considera el contenido de oxígeno, la presencia de iones hidrógeno, el ión cloro, ión sulfato, sulfhídrico, dióxido de carbono, amoníaco y sólidos totales, 10 - el **ensayo de un pozo** puede efectuarse mientras está instalado el sistema de perforación, ensayo que suele insumir un día y que permite básicamente purgar el pozo; también puede realizarse un ensayo de corta duración el cual insumiría de uno a siete días siendo útil par tener idea sobre el caudal, la temperatura, la presión, la depresión y la capacidad de recuperación del recurso; los ensayos de corta duración implica la realización de ensayos de bombeo a diferentes valores de caudal; los ensayos de larga duración tienen una duración de 30 días y sirven para evaluar la permeabilidad, las fronteras del reservorio y las áreas de recarga.

La figura 2.1 muestra en forma esquemática magnitudes las termodinámicas características.

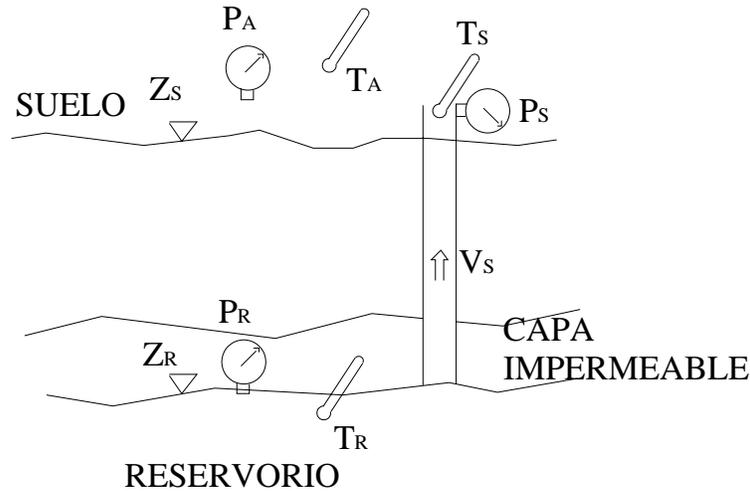


Figura 2.1 – Parámetros significativas

Se supone que el fluido geotérmico en el reservorio se encuentra a temperatura T_R , la presión es P_R y se encuentra a una cota Z_R . En la superficie del terreno local la cota es Z_S , la presión se supone iguala la ambiente P_A , así como la temperatura ambiente T_A .

Para la presión P_R y temperatura T_R , el fluido geotérmico presenta una entalpía h_R .

El fluido geotérmico, al ser transportado hacia la superficie intercambiará calor con el medio que lo rodea, como lo son, las paredes de la conducción, dando lugar a una pérdida Q_p . Esta pérdida de calor depende del área del tubo, la diferencia de temperatura entre el fluido geotérmico (T_{fl}) y el terreno circundante (T_p) y del coeficiente de trasmisión térmica global (U_p). Este último depende de las características del material de la conducción incluida el aislamiento térmico que se disponga de las características termodinámicas del suelo y del régimen del flujo en el interior de la conducción. La pérdida se podrá expresar como

$$Q_p = U_p \cdot A_p \cdot (T_{fl} - T_p)$$

Suponiendo que el fluido geotérmico se comporta como un fluido incompresible durante el proceso de ascensión, la ecuación de balance mecánica expresa que

$$\frac{P_R}{\gamma} + Z_R + H_B - \zeta_{RS} = \frac{P_S}{\gamma} + Z_S + \frac{V_S^2}{2g}$$

H_B es la potencia que debe aportar un equipo de bombeo, en caso de ser requerido mover un gasto másico m_R . ζ_{RS} es la pérdida de potencia mecánica que se produce en dicho flujo. A partir de este balance es posible deducir la presión que presentará el flujo al alcanzar la superficie local.

Como ya se mencionó, el flujo sufrirá además un a pérdida térmica Q_P de manera que

$$m_R (h_R - h_S) = Q_P$$

h_S es la entalpía que presentará el flujo al alcanzar la superficie del sitio local. Conociendo la entalpía h_S y la presión P_S , se podría deducir la temperatura que presentaría el flujo al llegar a la superficie.

En la superficie se tendrá una potencia térmica disponible Q_D , que se podría estimar como

$$Q_D = m_R (h_S - h_A)$$

h_A es la entalpía del flujo geotérmico en condiciones ambientes P_A y T_A .

La potencia mecánica disponible será

$$P_{MD} = m_R \cdot g (H_S - H_A)$$

H_A es la carga en condiciones ambientes. El proceso al que se propone entregar potencia mecánica y/o potencia mecánica, demandará una potencia térmica Q_U , que se estima como

$$Q_U = m_R (h_S - h_f) = m_R \cdot c_P \cdot (T_S - T_f)$$

en que h_f es la entalpía del flujo luego de intercambiar calor con el proceso considerado y T_f la temperatura de tal flujo. Algo similar se puede plantear para la demanda de potencia mecánica (P_{MU}) la cual se puede estimar como

$$P_{MU} = m_R \cdot g (H_S - H_f)$$

en que H_f es la carga a la salida del proceso.

En ambos casos se supone que el flujo geotérmico cede potencia al proceso.

Q_U y P_{MU} sería la demanda nominal del proceso. Estas demandas incluirán las pérdidas propias del proceso. Ahora bien, el proceso considerado presentará una curva característica de demanda de potencia que vincula la demanda de potencia con el tiempo. En la figura 2.2 se presenta en forma esquemática tal curva

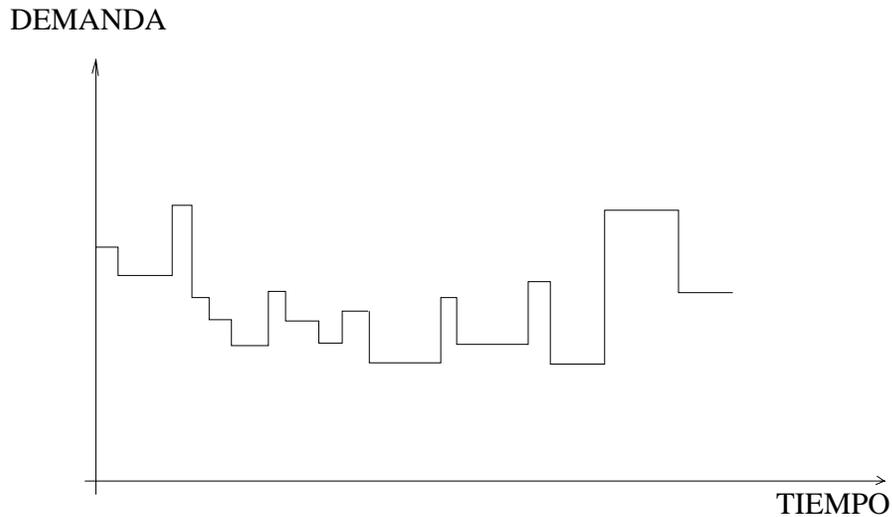


Figura 2.2 – Curva de demanda de potencia de un sistema

En un periodo de tiempo dado, tendrá entonces un consumo de energía (E_U), el cual puede ser obtenido integrando la curva de demanda presentada en al figura 2.2. Por otro lado, la energía que se hubiera consumido (E_N) en el periodo de tiempo considerado (ΔT) si el sistema hubiera demandado la potencia nominal de utilización (Q_U) se puede estimar como

$$E_N = Q_U \cdot \Delta T$$

El cociente entre E_U y E_N denominado factor de capacidad, expresa la efectividad del uso que se hace del recurso disponible. Debe destacarse que la instalación donde ocurre el proceso puede presentar períodos de tiempo en el cual no es posible operarla debido a motivos tales como mantenimiento, reparación, estrategias de operación, etc. Se busca minimizar este tiempo, resultando una proporción p del tiempo considerado. Suponiendo una demanda uniforme, el producto entre el factor de capacidad y la proporción de tiempo en que la instalación permanece operativa se denomina factor de planta.

Debe destacarse que el análisis antes presentado a los efectos de caracterizar el recuso energético presenta variantes, como lo es el caso del uso de bombas de calor, que se describirán en el siguiente capítulo, las cuales durante una parte del año demandan calor del reservorio geotermal y durante otro periodo del año podrían aportar calor a reservorio. En dichos casos el análisis debería dividirse en períodos de tiempo en los cuales ocurre el flujo de calor en una dirección.

Otro aspecto que debería considerarse son las características que puede presentar el intercambio de calor entre el flujo que asciende y el terreno circundante. Antes, la potencia térmica que intercambia el fluido con el terreno fue estimada utilizando un coeficiente de intercambio térmico global (U_p) que supone el conocimiento del coeficiente de conducción térmica o de la resistencia al paso de calor del terreno. Esta estimación sería válida para procesos rápidos, pues considera los valores instantáneos de temperatura. Ahora bien, si se analizara ese intercambio de calor en períodos de tiempo mayores, el flujo de calor se podría descomponer en componentes de diferente escala de tiempo, haciendo un análisis espectral. El flujo de calor para cada escala puede presentar distintas resistencias debido a la ocurrencia de fenómenos de distinta escala temporal. La turbulencia que presenta el flujo en el interior de la cañería será significativa para analizar el intercambio de calor instantáneo. Si se pasara a períodos semanales, se debería considerar la evolución de la curva de demanda. Si se pasara a una escala mensual en el flujo de calor se debería considerar los cambios estacionales. Pasando a escalas anuales aparecen como significativos los procesos naturales como son los movimientos del magma, la actividad volcánica y el decaimiento de elementos radioactivos. La energía térmica perdida por el flujo en su ascenso, ó la ganancia en su descenso, se podría estimar como

$$E_p = \int_0^T Q_p . d\tau = (f_1 . U_1 + f_2 . U_2 + \dots + f_N . U_N) . A . \Delta t$$

en que los U_i serían los coeficientes de intercambio de calor global para cada escala y los f_i la proporción del tiempo durante el cual actuarían.

3 – Utilización del recurso geotérmico

Si bien la viabilidad de la utilización del recurso geotermal depende de la energía disponible, caracterizado a través de la temperatura y del caudal del agua que podría ser extraída produciendo una depresión admisible, la factibilidad estará ligada a las características de la perforación.

En un aprovechamiento geotérmico se identifica el siguiente conjunto de características:

- **Profundidad del recurso** – En general resulta lo más significativo en el costo de la instalación. A los efectos de fijar ideas, para las profundidades típicas en la región que serían de entre 600 m y 1000 m, se podría estimar la inversión requerida en un pozo para ser explotado en el orden de U\$S 400.000.
- **Distancia entre producción y usuario** – Se trata que sea lo menor posible debido a los costos inicial y de operación que se incorporan al realizar conducciones de mayor longitud. El costo de operación adicional estará asociado a las pérdidas de energía térmica y pérdidas de energía mecánica. Sería recomendable tener conducciones inferiores 1.5km

- **Caudal del pozo** – La energía que entrega un pozo es directamente proporcional al caudal. Un buen recurso entregaría un caudal de entre $90\text{m}^3/\text{h}$ a $180\text{m}^3/\text{h}$.
- **Temperatura del recurso** – Este parámetro restringe el tipo de utilización, tal como se sugiere en el diagrama de Lindal,(ver figura 1.1). Si bien la energía disponible puede ser muy importante, la temperatura del agua podría ser inferior a lo requerido para el caso específico. En los sistemas de uso directo la temperatura del sistema debería ser algo inferior a la del reservorio, salvo si se utiliza una bomba de calor, caso en el cual la temperatura del sistema podría ser mayor que la temperatura del fluido geotermal.
- **Cambio de temperatura en el sistema usuario** – En la medida que el caudal a ser obtenido en un pozo geotermal está limitado por la capacidad del mismo, la potencia térmica que se extrae del recurso geotermal resulta proporcional al salto de temperatura que sufre el flujo al circular por el intercambiador de calor destinado a tal fin. Como se mencionara en el capítulo anterior, sería entonces razonable que dicho salto sea lo mayor posible, lo cual llevará a disminuir los costos de producción de energía debido a que la cantidad de energía sería mayor. Esto resulta un contraste frente a otros sistemas que trabajan con saltos de temperatura lo menor posibles, como ser en caso de sistemas en base a solar térmica.
- **Dimensión de la carga** – La utilización de un recurso energético a gran escala brinda el beneficio de la economía de escala, en particular lo vinculado al pozo y a la transmisión. Sería recomendable hacer un uso importante del recurso disponible, ya sea por la dimensión del sistema de utilización o por componerse el mismo de distintos tipos de uso que permitieran hacer un uso más efectivo del mismo. A los efectos de ilustrar lo anterior supóngase un reservorio a 70°C , con una capacidad de hasta $200\text{m}^3/\text{h}$. En caso de alimentarse un sistema de curado de hormigón, para lo cual la temperatura debería estar por encima de 60°C y un consumo de agua de $200\text{m}^3/\text{h}$, esto daría lugar a una demanda de potencia de 2.3kW . En forma alternativa se podría dimensionar un sistema que consume $50\text{m}^3/\text{h}$ pero alimentar tres procesos diferentes. Un secado de frutas para lo cual la temperatura debe permanecer por encima de 60°C , un sistema de desongelamiento para lo cual la temperatura debería ser mayor a 30°C y una bomba de calor para lo cual la temperatura debería ser mayor a 20°C . En este caso la demanda de potencia sería 2.9kW . Un elemento que debe ser señalado es que el uso del recurso en un único proceso puede dar lugar a un menor consumo de energía y por lo tanto podría un menor factor de capacidad, en tanto que el uso múltiple podría asegurar un uso más efectivo del recurso geotermal.
- **Factor de capacidad** – La viabilidad de un sistema de utilización de energía geotérmica, así como de otros recursos energéticos, depende fuertemente de este parámetro, siendo preferible elevados factores de capacidad. A los efectos de tener elevados factores de capacidad se podrían seleccionar aplicaciones que presenten intrínsecamente elevados factores de capacidad o bien disponer en la instalación de sistemas que sean capaces de satisfacer las demandas de potencia de pico, como podrían ser otras fuentes de energía.
- **Composición del fluido** – La calidad del agua del pozo tiene influencia sobre la selección de los materiales debido al efecto de abrasión y corrosión que puede tener el fluido geotermal sobre los mismos, así como sobre la disposición final que se

puede hacer del fluido geotermal una vez utilizado y la estrategia de utilización del recurso. Esto último se refiere a la conveniencia de hacer un uso indirecto del recurso. Esto se refiere a que el fluido geotermal podría circular en un circuito cerrado con un intercambiador de calor en el cual se aporta calor al sistema de utilización, o bien se podría hacer circular un fluido por un intercambiador de calor sumergido en el pozo de explotación del recurso geotermal. Esta estrategia no sería aplicable a los sistemas de uso directo como lo es la generación de energía eléctrica que utiliza el fluido geotermal en fase vapor.

- **Facilidad de disposición final** – La presencia de algunas sustancias limita la utilización del fluido geotermal una vez que fuera utilizado en un sistema de conversión energética. Entre tales sustancias puede destacarse el sulfhídrico, debido a los olores, el ion Boro, el cual podría dañar los cultivos, el ion Fluor, debido a que limita el uso del agua como potable y especies radioactivas debido a los límites en que pueden estar presentes en el aire, agua y suelo.
- **Tiempo de vida del recurso** – El desarrollo del recurso debería ser efectuado de manera de asegurar una vida útil de entre 30 y 50 años.

El uso del recurso puede ser directo, en cuyo caso el fluido que se extrae del pozo se utiliza para cumplir una determinada operación, o indirecto, en cuyo caso el fluido geotérmico entrega energía a otro fluido que se utiliza en el sistema usuario.

En los sistemas de uso directo del recurso geotermal el fluido geotermal es extraído desde un pozo, con la ayuda o no de un equipo de bombeo y es impulsado hacia la utilización donde se requiere la potencia térmica. En este tipo de utilización se puede identificar los siguientes componentes:

- **Sistema de producción** – Incluye el pozo y el equipamiento que opera en el cabezal, tal como el equipo de bombeo, válvulas de regulación de caudal, medidores de caudal, etc.
- **Sistema de transmisión y distribución** – Desde la producción al usuario. En este sistema la incorporación de aislamiento térmico, al igual que el diámetro de la cañería, sería decidido en base a un análisis de factibilidad de la instalación. En dicho análisis debería tenerse en cuenta la longitud de la cañería, el caudal que se maneja, así como el costo de la instalación y del aislamiento térmico.
- **Sistema usuario**
- **Sistema de disposición final** – superficial o retorno a la fuente. El retorno a la fuente tiene como inconveniente que el fluido geotermal, en este tipo de sistemas pudo haber sido contaminado, por lo que se requerirá algún tratamiento adicional. La disposición superficial debe ser efectuada teniendo en cuenta los aspectos destacados más arriba respecto a su composición.
- **Sistema de respaldo y absorción de picos** – Se deberían absorber faltas de recursos y consumos de pico, lo cual podría realizarse haciendo acumulación de fluido geotermal o disponiendo de otras fuentes de energía. La necesidad de reserva está asociada a lo crítico que sería no disponer del recurso energético. A modo de ejemplo, en caso que el sistema geotermal alimente un equipo de frío, su falta

significaría romper la cadena de frío del producto, lo cual podría dar lugar a pérdidas de producción. También si se utilizara en la calefacción de cultivos o de viviendas en momentos particulares de la producción o en temporada de bajas temperaturas, la falta de recurso geotermal podría ser crítico. La absorción de picos de demanda por parte del sistema geotermal, puede dar lugar a un innecesario sobre dimensionamiento del sistema, lo cual incrementa la inversión requerida, conduce a una utilización parcial de la potencia instalada, lo cual llevaría a tener menores rendimientos así como períodos de repago mayores. La necesidad de reserva como de absorber los picos de demanda, podrían ser satisfechos disponiendo de otras fuentes de energía, como podría ser gas natural o gas líquido de petróleo, el cual es abundante en la región. También podría disponer de acumuladores térmicos que utilizan materiales de elevada capacidad térmica, alrededor de los cuales se haría circular el fluido geotermal o bien el fluidos que se utilice en los casos de utilizaciones indirectas.

Una primera forma de utilización del recurso geotérmico, y la más extendida, es hacer circular el fluido geotérmico, es decir el que se encuentra en el reservorio geotérmico ya sea incorporando energía mecánica de bombeo o no, desde dicho reservorio hasta la superficie donde se efectúa el proceso de conversión o transferencia energética. Bajo esta forma existe un uso directo del recurso energético. Un ejemplo de dicho tipo de utilización es la generación de energía eléctrica. En ese caso el vapor se expande en una turbina de vapor, la cual mueve un generador de energía eléctrica. Esta aplicación se hace para temperaturas del reservorio mayores a 160°C. En esta categoría se incluyen las instalaciones que incorporan tanques de producción y separación de vapor (tanques flash). Suponiendo que la temperatura de la fuente fría fuera 20°C, el rendimiento teórico de estas plantas sería de entre 32% y 49% para temperaturas del reservorio entre 160°C y 300°C. En estos casos, en que el fluido circula directamente por la turbina, se debe tener en cuenta el rendimiento de la turbina que se podría estimar en el 95%. El rendimiento sería del orden de entre 30% y 47%. En el caso de los sistemas con tanque flash el fluido geotermal se utiliza solo parcialmente para ser expandido en la turbina. El tipo de turbina a utilizar dependerá de los niveles de presión y caudal disponibles, pudiendo ser de reacción o de acción.

En los usos directos de tipo térmico, el fluido geotérmico circula por un intercambiador de calor que entrega calor al proceso directamente. A modo de ejemplo, en un sistema de calefacción residencial, el fluido geotérmico circulará por el intercambiador de calor que entrega calor al aire del ambiente como se presenta en forma esquemática en la figura 3.1.

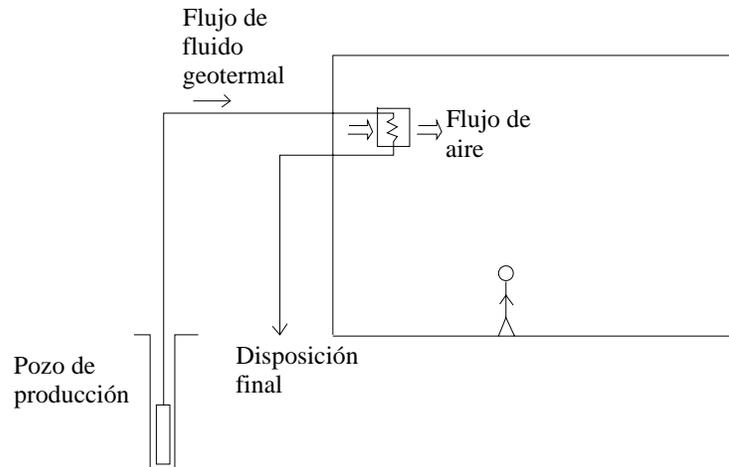


Figura 3.1 – Esquema de uso térmico directo

Este tipo de aplicación térmica se podría realizar en diversas utilidades residenciales, industriales o agrícolas. Además de las pérdidas que se tendrían en las conducciones, se tendrá las pérdidas en la unidad de intercambio térmico. Debe tenerse en cuenta que el fluido geotérmico puede resultar abrasivo, por la presencia de partículas y corrosivo, por la presencia de diversas sustancias, lo cual agregaría solicitudes adicionales sobre las conducciones e intercambiadores de calor. En caso de seguir la estrategia de uso directo se debería incorporar sistemas de filtrado y eliminación de sustancias agresivas.

También se puede hacer un uso indirecto del recurso geotérmico. Este uso indirecto se refiere a que, el fluido geotérmico cede calor a otro fluido, el cual se utiliza en el proceso en cuestión.

Un primer uso del tipo indirecto es la generación de energía eléctrica en ciclos de tipo binario. Esta práctica se realiza para temperaturas del reservorio de entre 95°C y 160°C. Debe destacarse que en este caso aparece una pérdida de calor adicional, respecto a los ciclos convencionales, debido a la presencia del intercambiador de calor. Estos dispositivos podrían tener un rendimiento del orden del 66%, por lo que el rendimiento de los ciclos binarios sería de entre 10% y 20%.

En los usos térmicos de tipo indirecto, el fluido que entrega calor al proceso de interés se hace circular por un intercambiador de calor donde recibe o cede calor al fluido geotérmico.

Una primera forma sería hacer circular un fluido por el reservorio manteniéndolo confinado en un dispositivo que permitiera el intercambio térmico, para luego utilizar ese fluido en el proceso de interés. Un ejemplo de este tipo de aprovechamiento serían los intercambiadores de calor ubicados en el pozo.

Los intercambiadores de calor en el pozo se sumergen en el pozo, donde hay fluido geotérmico a elevada temperatura, haciéndose circular otro fluido, en general agua, para su utilización por su interior. Parecen ser adecuados para potencias térmicas relativamente

pequeñas (menos de 0.8MW) y profundidades no mayores a 450m. En la bibliografía se previene el uso de materiales que soporten la corrosión, siendo especialmente agredidas las piezas en la interfase agua-aire. Existen referencias de uso para pozos entre 12m y 60°C a 170m y 94°C. Se plantean diferentes formas de utilizar la potencia térmica. En el pozo se dispone un intercambiador de calor constituido por un tubo con un codo de 180° en el fondo, el cual forma parte de un sistema de calefacción. En la figura 3.2 se presenta un esquema de este tipo de intercambiadores. Este intercambiador de calor puede ser complementado con otro intercambiador destinado al calentamiento de agua para su utilización, o bien se puede practicar una extracción en el intercambiador de calor. La circulación puede hacerse por termosifón o con la ayuda de una bomba.

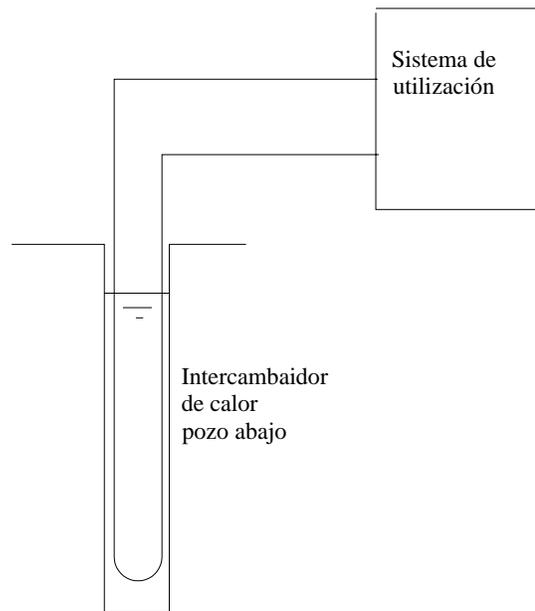


Figura 3.2 – Intercambiador de calor pozo abajo

El fluido geotérmico con el cual se produce el intercambio de calor presenta un gradiente de temperatura, lo cual hace que se tenga un pobre funcionamiento térmico de los intercambiadores pozo abajo. Para aumentar el intercambio térmico se suele disponer algún sistema que promueva la uniformización de la temperatura en la profundidad del pozo. Una primera forma sería disponer una camisa metálica en el pozo de diámetro menor al mismo y con ranuras verticales ordenadas circunferencialmente a la camisa a dos alturas diferentes, una cerca al fondo del pozo y otra algo por debajo del menor nivel que adopta el pozo tal como se presenta en la figura 3.3.

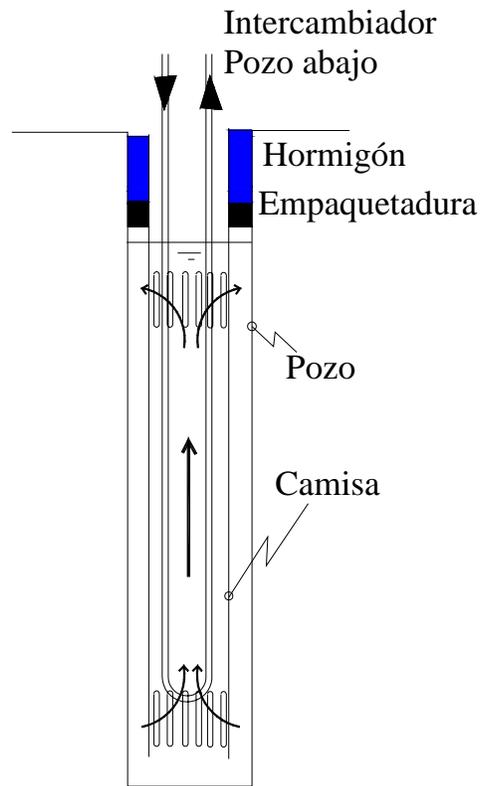


Figura 3.3 – Pozo encamisado

Esta camisa está ajustada con una empaquetadura, que por encima y hasta el suelo se dispone concreto para sellar. Esta camisa ranurada promueve que se genere una corriente dentro del pozo, ascendiendo por el interior de la camisa, sale por las ranuras exteriores, baja por el espacio anular entre la camisa y la superficie exterior del pozo y entra a la camisa por las ranuras inferiores. En forma alternativa se puede instalar dentro del pozo un tubo con las dos hileras circunferenciales de ranuras como se esquematiza en la figura 3.4.

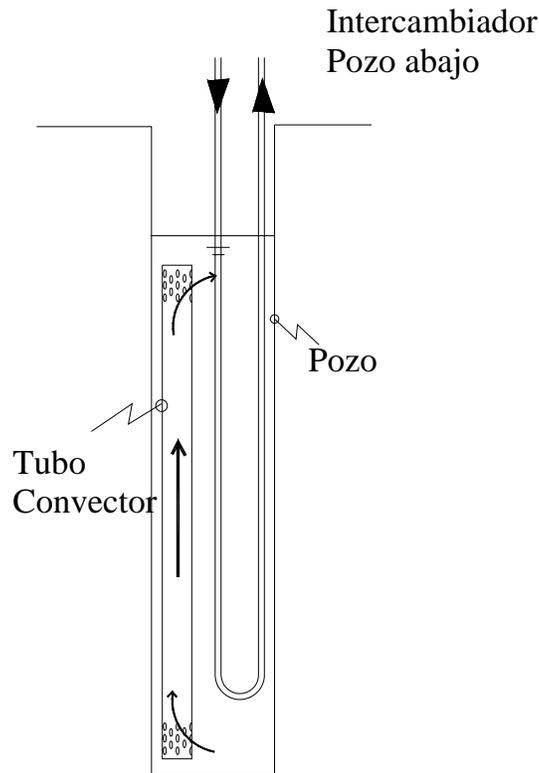


Figura 3.4 – Pozo con tubo convector

Este tubo, al cual se denomina convector, presenta una longitud del orden de la diferencia de cotas entre el fondo del pozo y el nivel de agua libre bajo bombeo. A partir del uso de pozo encamisados o de tubos convectoros hace que en pozos donde se tienen gradientes de $0.36^{\circ}\text{C}/\text{m}$, se logre un campo uniforme de temperaturas del orden de las existentes en el fondo del pozo. Se ha visto que si el intercambiador de calor pozo abajo se dispone en la zona anular se tiene mayor salida de potencia respecto a lo que se logra ubicando el intercambiador dentro del tubo. En este último caso se logra, a su vez, una mayor potencia térmica si la corriente en la zona anular es ascendente es decir, contrario a lo presentado en la figura 3.4. Esta configuración de flujo más efectiva requiere una potencia para ponerla en marcha, pues por termosifón se pone en marcha la otra configuración, es decir descendiendo por la zona anular y ascendiendo por dentro del tubo.

Otro tipo de intercambiador de calor utilizado en sistemas geotérmicos es el intercambiador de calor de placas. Este intercambiador se compone de una serie de placas alrededor de las cuales circula el fluido geotérmico de un lado y un fluido del otro, que será utilizado en el sistema usuario. En la figura 3.4 se presenta un esquema de un corte de este tipo de intercambiadores de calor.

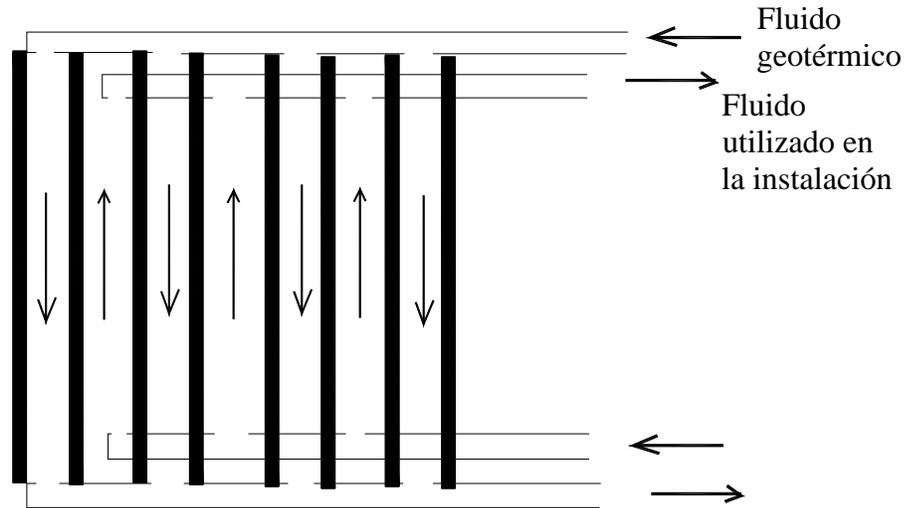


Figura 3.4 – Intercambiador de calor de placas.

Estos intercambiadores son sencillos de limpiar y las placas pueden ser construidas de diferentes materiales, presentando coeficientes de intercambio de calor del orden de $2400\text{W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ lo cual los hace aptos para operar con fluidos geotérmicos. Otro tipo de intercambiador de calor es el de tubo y carcasa. En estos intercambiadores de calor, de uso intensivo en sistemas convencionales, resulta más difícil la realización de mantenimiento

En un mismo sistema puede haber usos indirectos del recurso geotérmico como es servir de apoyo de una caldera en un sistema de calefacción como precalentador de agua, pero además como precalentador de aire, como fuente de calor para un sistema de calefacción.

Los equipos destinados a intercambiar calor con el fluido geotérmico deben manejar temperaturas relativamente bajas y suelen diseñarse para lograr diferencias de temperatura entre la entrada y la salida del dispositivo de intercambio relativamente elevadas.

Los dispositivos utilizados para intercambio de calor destinados a acondicionamiento térmico de espacios son: serpentines finos que intercambian calor con aire los cuales son capaces de manejar temperatura tan bajas como 40°C a 50°C y pisos radiantes con los cuales es posible manejar agua con temperatura de hasta 35°C . Los convectores no resultan apropiados. En sistemas de calentamiento de agua, se utiliza para precalentamiento.

Dentro del equipamiento que se utiliza en un sistema geotérmico se destacan las bombas que succionan el fluido desde el pozo. Entre las bombas que utilizan se destacan las bombas de pozo y las sumergibles. En general el motor que mueve las bombas es eléctrico y no tienen ajuste de velocidad.

Respecto a los materiales que se suelen utilizar en aprovechamientos geotérmicos se destacan los aceros inoxidable, materiales plásticos, titanio. El cobre y el aluminio no son recomendados. A los efectos de paliar los efectos de la corrosión podría utilizarse materiales resistentes a tal sollicitación, remover el oxígeno y utilizar acero al carbono, ó utilizar sistemas de tipo indirecto de manera de confinar la zona en contacto con el fluido geotérmico.

4 - Actividades industriales y domésticas que requieren energía

A nivel industrial se destaca el uso de la bomba de calor. Entre las bombas de calor que utilizan el recurso térmico disponible en el suelo pueden distinguirse las bombas de calor acopladas al suelo (GCHP), las bombas de calor que utilizan el agua subterránea (GWHP) y las bombas de calor que utilizan el agua superficial (SWHP).

Las bombas de calor acopladas al suelo disponen de un intercambiador de calor enterrado o pozo abajo. Este intercambiador opera en un circuito cerrado, el cual también incluye un intercambiador de calor agua-refrigerante que opera de condensador o evaporador del ciclo de vapor dependiendo si su función es calefaccionar o refrigerar. En la figura 4.1 se presenta un esquema de este tipo de sistema. El intercambiador de calor enterrado puede ser vertical o horizontal. En el primer caso debe practicarse un agujero profundo en el suelo, mientras que en el segundo se debe hacer una trinchera donde ubicar las cañerías.

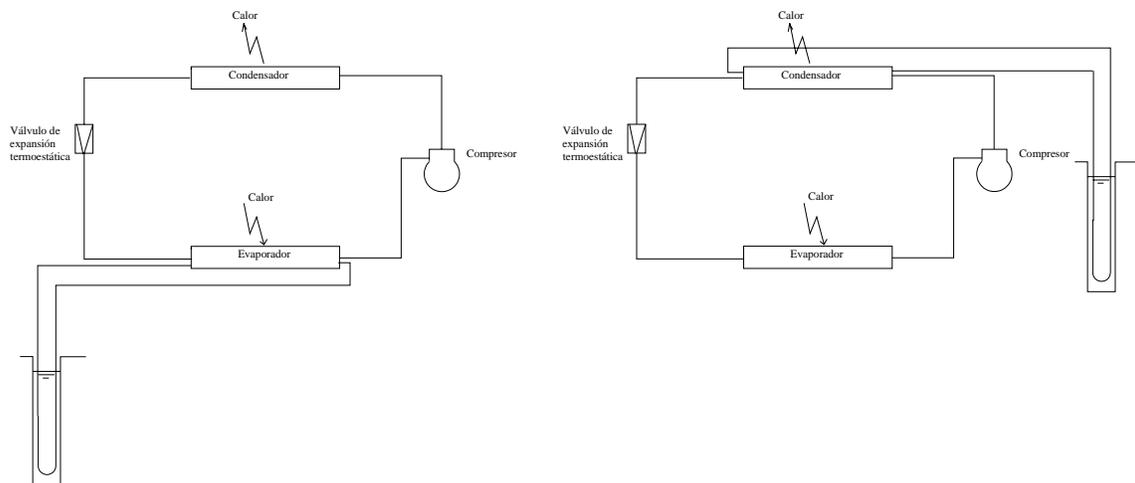


Figura 4.1 – Bomba de calor GCHP

El fluido geotérmico podría ser utilizado tanto para entregar calor al sistema a través del evaporador cuando el sistema se utilice como bomba de calor o para recibir calor en caso que el mismo actúe como refrigerador.

Las bombas de calor que utilizan agua subterránea disponen de un circuito abierto por el cual circula agua del acuífero succionando del mismo y descargando hacia la disposición final, la cual circula por un intercambiador de calor, por el cual también circula agua que, tal como se muestra en la figura 4.2, luego se dirige al condensador o al evaporador de la bomba de calor.

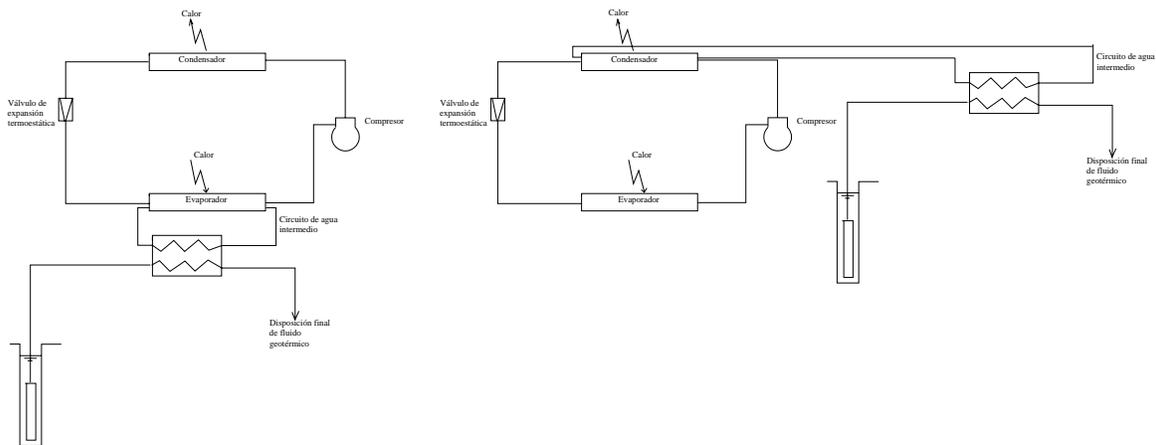


Figura 4.2 – Bomba de calor GWHP

Las bombas de calor que utilizan agua superficial, si bien no constituye estrictamente una utilización del recurso geotérmico, utiliza el calor acumulado en un cuerpo de agua como puede ser un lago, ver figura 4.3. En este caso se sumerge una tubería en el cuerpo de agua, la cual actúa como intercambiador de calor en un circuito cerrado que dispone otro intercambiador que interactúa con la bomba de calor.

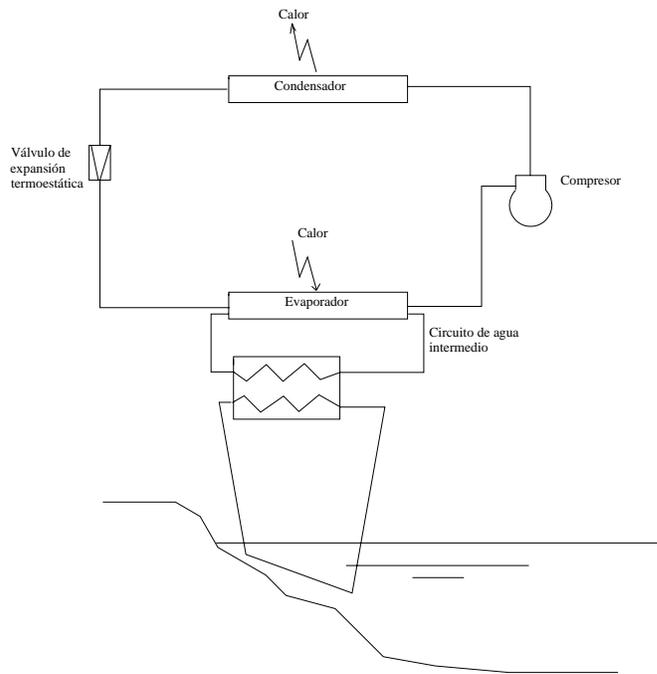


Figura 4.3 – Bomba de calor SWHP

El diseño de los sistemas que operan con bombas de calor acoplados al suelo tiene la dificultad de la forma en la cual el calor se transmite en el suelo y la forma en la cual evoluciona la temperatura del medio con el cual se realiza el intercambio de calor, tal como se refiere en el capítulo 2 de este informe. Respecto a esto último, la temperatura del suelo podría presentar evoluciones de escala anual o de varios años, variaciones de escala estacional o mensual y variaciones de escala diaria o horaria. El calor (q), que el recurso geotérmico intercambia con el sistema correspondiente, depende de la diferencia de temperatura entre el recurso (t_g) y el fluido (t_w) que se utiliza como vector energético, es decir para recibir calor del recurso geotérmico, transportarlo y volcarlo en la utilización del área de la superficie de intercambio, la cual resulta proporcional a la profundidad del pozo (L), y del coeficiente de intercambio o de su inversa la resistencia al intercambio de calor (R).

$$q = \frac{L(t_g - t_w)}{R}$$

La incógnita suele ser la longitud que debería tener el pozo a practicar en el suelo para lograr el intercambio de calor de diseño. Para ello, siguiendo la propuesta de Ingersoll and Zobel (1954), se supone que la variación de intercambio de calor se compone de pulsos de diferentes escalas temporales como son anual, mensual, diario e instantánea, tal como se

expusiera en el capítulo 2. La respuesta del suelo a estos pulsos de distinta escala temporal es diferente y se la expresa a través de valores de resistencia al intercambio de calor sean R_a (anual), R_{gm} (mensual), R_{gd} (diario) y R_p (instantáneo). En procesos de escala diaria se supone que parte de la energía térmica intercambiada en el pozo no llega a la carga existiendo un corto circuito térmico con otros componentes intermedios, lo cual se expresa a través de un factor F_{SC} . También se supone que la carga mensual de diseño se utiliza sólo parcialmente definiéndose un factor de carga (PLF_m). Se supone que hay un intercambio de calor anual neto entre el fluido y el reservorio, (q_a) el sistema tendrá un requerimiento de calor de diseño (q_{lh}), y un requerimiento de calor de enfriamiento de diseño (q_{lc}). La potencia de diseño para el circuito de calentamiento W_h y la potencia de diseño para el circuito de enfriamiento W_c . La temperatura del reservorio geotérmico es t_g , la temperatura del agua de entrada al intercambiador geotérmico es t_{wi} y la temperatura del agua de salida es t_{wo} . Esta metodología sugiere incorporar una penalidad a la diferencia de temperatura (t_p) debido al intercambio de calor que puede haber con otros pozos cercanos.

La longitud del pozo para lograr satisfacer la carga de calor de refrigeración (L_c) ó la carga de calefacción (L_h) se podría calcular de la siguiente manera.

$$L_c = \frac{q_a R_{ga} + (q_{lc} - 3.41W_c)(R_p + PLF_m R_{gm} + F_{SC} R_{gd})}{t_g - \frac{t_{wi} + t_{wo}}{2} - t_p}$$

$$L_h = \frac{q_a R_{ga} + (q_{lh} - 3.41W_h)(R_p + PLF_m R_{gm} + F_{SC} R_{gd})}{t_g - \frac{t_{wi} + t_{wo}}{2} - t_p}$$

En el caso de los sistemas horizontales se maneja la realización de trincheras en las cuales se ubican de uno a seis tuberías, pudiéndose efectuar un planteo similar al caso vertical para el cálculo, sólo que la dimensión principal es horizontal. En este caso, seguramente, se requiera aumentar la longitud de la cañería total o más precisamente la superficie de intercambio. Si se incrementara el número de cañerías, se podría disminuir su longitud, con lo cual se pude disminuir la superficie de terreno ocupada. Otra alternativa para aumentar el área de intercambio es enrollar la cañería de forma de hacer un serpentín desarrollado horizontalmente. En este caso particular debe tenerse cuidado al tapar la cañería de manera de asegurar un íntimo contacto entre la cañería y la tierra de relleno. Para cada configuración debería elegirse cuidadosamente el coeficiente de intercambio térmico, debido a la interferencia que producirán la presencia de varias cañerías.

Un ciclo de vapor está integrado por cuatro componentes: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador, tal como se esquematiza en la figura 4.4

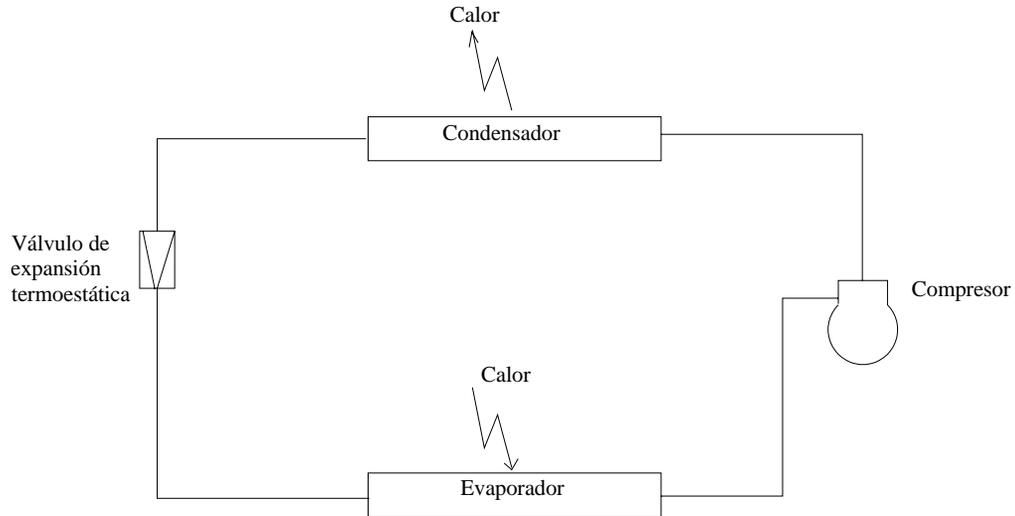


Figura 4.4 Figura de un ciclo de vapor

El compresor entrega potencia al vapor según un proceso politrópico con el objeto de elevar la presión del mismo y así su temperatura. Usualmente, a la salida del compresor se tiene vapor sobre calentado del fluido utilizado. En el condensador el vapor entrega calor siguiendo un proceso a presión constante de manera que en su salida se tenga líquido saturado. En la válvula, siguiendo un proceso adiabático, es decir, sin que cambie la entalpía, el líquido desciende su presión a entalpía constante, de forma de obtener vapor con una relativamente baja cualidad, es decir es una mezcla de vapor y líquido con una elevada proporción de este último en masa. En el dispositivo denominado evaporador la mezcla de líquido y vapor recibe la cantidad de calor necesaria como para obtener vapor saturado seco a su salida.

En la figura 4.5 se presenta una ley de estado típica de un fluido utilizado en un ciclo de vapor, en un diagrama presión (ordenada) – entalpía (abscisa)

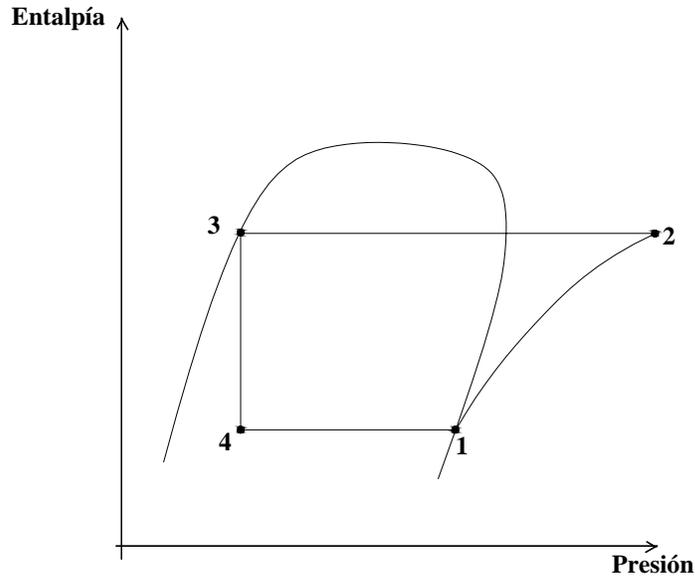


Figura 4.5 Ciclo de vapor en un diagrama de estado presión -entalpía

El proceso que el fluido sigue en el compresor es el 1-2, en el condensador 2-3, en la válvula, 3-4 y en el evaporador es el 4-1.

Cuando el ciclo de vapor actúa como ciclo refrigerador, el evaporador se encuentra en contacto con un ambiente del cual recibe calor. Por lo tanto ese ambiente se encuentra a mayor temperatura que el vapor del ciclo en el evaporador. Ese ambiente puede ser el aire de una sala o bien agua de un sistema para enfriar o congelar agua. En este caso el condensador libera calor hacia un medio a menor temperatura que es un sumidero con capacidad de evacuar el calor recibido a través de algún proceso. En caso de utilizarse energía geotérmica, en este caso el agua a elevada temperatura del reservorio o calentada con agua del reservorio es la que recibe el calor del ciclo y la vuelca al reservorio geotérmico. Es decir que el reservorio geotérmico presentará una temperatura inferior al del ciclo de vapor en el condensador. En resumen el calor que se extrae del ambiente a refrigerar se vuelca al reservorio geotérmico.

En caso en que el ciclo de vapor se utilice como bomba de calor, el agua del reservorio geotérmico o bien la calentada con el mismo, se utiliza para entregar calor en el evaporador. De esto se deduce que la temperatura del reservorio es mayor a la del fluido del ciclo en el evaporador y por otro el reservorio entrega calor.

El coeficiente de funcionamiento (COP) de un ciclo de vapor se define como el cociente entre la potencia térmica intercambiada en la utilización, y la potencia mecánica aportada al ciclo de vapor. En la medida que por todos los componentes del circuito circula la misma masa de fluido por unidad de tiempo, este cociente de potencia se reduce al cociente entre las diferencias de entalpía que se establecen en cada componente. A continuación se presenta el COP_R y el COP_{BC} según el sistema actúe como refrigerador o como bomba de calor y utilizando la figura 4.5.

En el caso de una bomba de calor, el (COP) resulta mayor a la unidad, por lo que entregando una cierta cantidad de calor al fluido del ciclo de vapor en el evaporador (entalpía 1 menos entalpía 4) y entregando potencia en el compresor (diferencia de entalpía en 2 menos la entalpía en 1) se entrega una cantidad de calor al medio a través del condensador, (diferencia de entalpía en 2 menos entalpía en 3) mayor a la entregada por el reservorio geotérmico a través del evaporador. Si se considera un mismo ciclo de vapor, la diferencia entre el COP_{BC} actuando como bomba de calor y el COP_R actuando como refrigerador vale la unidad, por lo que el COP_{BC} trabajando como bomba de calor siempre es mayor a la unidad, en tanto que el COP_R como refrigerador resulta, en general, inferior a la unidad.

En el caso que el ciclo de vapor se utilice como calefacción y suponiendo que la temperatura en el condensador está fijada por la temperatura que se debe lograr en el ambiente a calefaccionar, en la medida que se incrementa la presión o temperatura del evaporador, y por lo tanto de la fuente con la cual intercambia calor este componente, aumenta la capacidad de calefacción del sistema. Este aumento de capacidad se produce debido al incremento del caudal másico que es capaz de entregar el compresor.

Si se compara la bomba de calor con la calefacción directa, utilizando en ambos casos un intercambiador de calor sumergido, por un lado, se tiene un incremento neto en el consumo de potencia, pues la bomba de calor consume la potencia de compresión, y, por otro lado, desciende el requerimiento de calor del reservorio. Este descenso de requerimiento se traduce tanto en la disminución del área del intercambiador de calor sumergido, como en la disminución del caudal de agua requerido. Este beneficio que presenta el uso de la bomba de calor en el aprovechamiento del recurso geotérmico se hace más evidente en la medida que la escala del aprovechamiento se incrementa.

Para el caso de sistemas de muy pequeño porte la calefacción podría ser más razonable hacerla utilizando en forma directa el fluido geotermal, a pesar de las dificultades que ello implica debido la corrosión y abrasión que puede haber asociada.

En Chiasson, tp11, presenta un análisis comparativo entre el uso de energía térmica para el calentamiento de una piscina de uso residencial en una vivienda donde se utiliza energía geotérmica para calentamiento y para refrigeración con bomba de calor. La piscina se supone enterrada con una coeficiente de conductividad térmica en el suelo de $2W/m.^{\circ}K$, la

vivienda tiene 186m^2 construidos, la piscina es de 9.1m por 6.1m por 1.5m y se fija un valor de consigna para la temperatura del agua de la piscina de 26.7°C . Además, se considera el caso de cubrir la piscina durante la noche o no cubrirla. Respecto a los costos manejados son de $26\text{U}\$/\text{m}$ de profundidad de pozo donde instalar el adicional del circuito enterrada, un costo inicial del sistema de bomba de calor de $3516\text{U}\$/\text{kW}$, un costo de energía eléctrica de $0.1\text{U}\$/\text{kW.h}$ y del gas natural de $0.3\text{U}\$/\text{m}^3$. Los sistemas considerados fueron: a) sólo la vivienda con acondicionamiento de aire, b) el anterior con bomba de calor para elevar la temperatura del agua de la piscina y c) el anterior con un intercambiador de calor para recuperar en parte el calor desde la piscina debidos a otros aportes como lo es la radiación solar y el intercambio por convección con el aire.

En los casos en que el sistema de acondicionamiento térmico está dominado por la carga de calefacción, el agregado del calentamiento de agua de la piscina resulta no factible debido al largo período de repago que resulta de la inversión en pozo adicional requerida. En la medida que la carga de refrigeración resulta mayor en al menos un 25% comienza a ser factible y más conveniente que la calefacción en base a gas a natural.

En Chiasson, tp118 se presenta un análisis de factibilidad sobre el uso de energía geotérmica para aportar calor en un invernadero. Se analizó la operación de un invernadero de 4047m^2 de superficie, una temperatura de 18.3°C y se analizó la factibilidad para un intervalo de costo de pozo de entre $13\text{U}\$/\text{m}$ y $39\text{U}\$/\text{m}$. Como alternativa se consideró el gas natural con un costo inicial de $284\text{U}\$/\text{kW}$ y un precio entre $0.18\text{U}\$/\text{m}^3$ y $0.7\text{U}\$/\text{m}^3$. El costo de la electricidad se estimó en $0.1\text{U}\$/\text{kW.h}$, un costo de mantenimiento de la caldera del 2% del costo inicial y una tasa de descuento del 6%. Se analizó sistemas en circuito abierto y en circuito cerrado, tomando como indicador el Valor Actual Neto (VAN) calculado para cada tarifa de gas natural y cada tarifa de construcción del pozo, correspondiente a la fracción de carga térmica satisfecha que hace mínimo al VAN.

El sistema en circuito abierto da un mejor resultado económico que el sistema en circuito cerrado. A modo de ejemplo, para una tarifa de gas natural de $0.25\text{U}\$/\text{m}^3$ y un costo de instalación de $30\text{U}\$/\text{m}$, en un sistema en circuito cerrado basado en energía geotérmica no sería factible mientras que un sistema en circuito abierto es factible y sería adecuado para alimentar más de la mitad de la carga del invernadero.

Un elemento interesante que presenta el artículo es la relación entre, para este caso particular, la tarifa del gas natural y el costo del pozo para satisfacer una misma fracción de energía total o bien la fracción del pico de demanda que es factible satisfacer.

También se destaca la conveniencia de satisfacer el pico con otra fuente energética, y así no sobredimensionar el sistema geotérmico.

En caso de hacer refrigeración, el tipo de sistema más adecuado sería el equipo de absorción. En este caso una fuente de calor entrega la potencia requerida para mover el fluido en el circuito y para promover el proceso de absorción y separación del refrigerante y la sustancia absorbidora. Los sistemas de absorción utilizan dos fluidos que pueden ser agua-amoniaco o agua – bromuro de litio. Un tercer componente gaseoso, como lo es el hidrógeno, es incorporado de manera que al agregar calor a la mezcla se eleva la presión lo

suficiente como para desplazar la mezcla de los líquidos antes mencionados. Según las referencias, tanto la capacidad de refrigeración como el COP descienden al descender la temperatura del reservorio geotérmico. Para temperaturas del recurso geotérmico de 116°C, se tendrían valores de COP de 0.65 a 0.70. Si la temperatura descendiera a 82°C, el COP sería del orden de un 80% del valor antes mencionado, mientras que la capacidad del sistema bajaría al 20% de lo que valdría para la temperatura de 116°C.

En Mérida, 2000 se presenta ejemplos de utilización del recurso geotérmico para el curado de bloques de hormigón y para el secado de frutas. Este tipo de actividades presentan el beneficio del uso del recurso geotermal, pero también posibilitan el desarrollo socioeconómico de zonas donde se tienen recursos energéticos escasos. A modo de ejemplo se podría citar la cocción de alimentos, tanto para auto consumo como para la venta, el procesamiento de cerámica, el destilado de bebida, el desarrollo de eco turismo, y la producción de hierbas medicinales y aromáticas.

En la región se tiene una amplia producción agrícola, la cual en general tiene asociado procesos de secado y maduración que requieren calor. A modo de ejemplo puede citarse la producción de cebolla y boniatos, tabaco, yerba mate, así como los cultivos bajo techo. También deben mencionarse productos que dependen fuertemente de la cadena de frío, en la cual el recurso geotermal puede aparecer como una fuente de energía para alimentar los sistemas de frío. Entre tales actividades puede citarse la industria láctea, la pesca, en especial la artesanal, el procesamiento de carnes, etc.

Cada una de las actividades que se mencionaron anteriormente presenta características propias, que llevarían a requerir recursos termales de diferente temperatura, por lo que en cada caso se deberán analizar la factibilidad. En el caso de la cebolla y el boniato se necesitaría relativamente bajos consumos de energía, pero potencias elevadas. En cambio el tabaco, la yerba mate y las hierbas aromáticas presentan bajos requerimientos de potencia pero elevados consumos de energía debido a los tiempos necesarios para realizar el proceso. Algo similar ocurrirá con el requerimiento de enfriamiento.

Al año 1998 existía una potencia instalada en el mundo de plantas geotérmicas de generación de energía eléctrica de 8150MW aproximadamente. Este valor parece no haber cambiado sensiblemente al año 2003.

Como ya se mencionara, básicamente existen tres tipos de plantas de generación. Un primer tipo es la que usan directamente el vapor que se tiene en el reservorio geotérmico. Se destacan las plantas precursoras instaladas en Lardarello, Italia, en Nueva Zelandia y en los Geysers en California, Estados Unidos. Un segundo tipo son las plantas tipo flash, en las cuales también se utiliza el fluido geotérmico a elevada temperatura, el cual es vaporizado en un tanque o bien en dos tanques. El vapor así generado puede presentar uno o dos niveles de presión. Un tercer tipo de central es el denominado sistema binario. En este caso el fluido geotérmico es utilizado para elevar la temperatura y vaporizar un fluido que luego es el que sigue el sistema de generación. A este sistema, como en los otros, se agrega un sistema de enfriamiento para condensar que puede ser en base a una torre de enfriamiento o bien del tipo seco utilizando enfriamiento con aire. Como fluido secundario se solía utilizar

refrigerantes cloro-fluor-carbonados, mientras que en la actualidad se utilizan hidrocarburos tales como iso-butano o pentano.

El Rafferty 2000 hace un interesante análisis de sensibilidad del rendimiento y del costo de generación de energía eléctrica con parámetros relevantes al funcionamiento de una planta de generación geotérmica como son la capacidad de la planta, la temperatura del recurso, la profundidad del pozo geotérmico y el factor de capacidad de la planta de generación.

El rendimiento teórico del ciclo termodinámico se obtiene como el cociente entre la diferencia de temperatura de la fuente caliente (caldera) y la fuente fría (condensador) y la temperatura de la fuente caliente. Debe considerar además que existen pérdidas en la transferencia de calor que pueden ser del orden del 33%. También hay pérdidas en el proceso de transferencia de energía en la caldera y en la turbina del 15% y 3% respectivamente. Además las centrales de generación disponen de equipos accesorios tales como bombas, ventiladores y controles que consumen energía eléctrica, las cuales se denominan cargas parásitas. El rendimiento neto de la planta es del orden del 47% del rendimiento teórico.

El rendimiento, como se mencionó antes, depende de diversos parámetros. A los efectos de analizar la sensibilidad del rendimiento se toma como referencia una planta que tiene un recurso a 121°C, una potencia nominal de generación de 300kW, la profundidad del pozo de producción de 305m, la profundidad del pozo de retorno de 198m, un factor de capacidad del 80%, una vida útil de 30 años. En Estados Unidos el costo de instalación resulta de U\$S1.278.000 y un costo anual de mantenimiento de U\$S63.000. Esta planta tendría un rendimiento neto del 10% y un costo de producción de 0.105U\$S/kW.h.

El análisis de sensibilidad presentado en Rafferty, 2000, presenta los siguientes aspectos:

- Si la potencia nominal se incrementara a 1MW el costo de producción bajaría a la mitad del valor de referencia, mientras que si la capacidad descendiera a 100kW el costo de producción sería más del doble que el valor de referencia.
- Un cambio de 11°C en la temperatura del recurso daría lugar a un cambio de entre 10% y 15% en el costo de producción.
- Un incremento de la profundidad del pozo de 700m daría lugar a un incremento del 38% en el costo de producción de energía eléctrica.
- A modo de ejemplo, si la potencia nominal de la planta fuera de 100kW, la temperatura del recurso de 95°C y la profundidad del pozo de 1000m, el costo de generación podría ser de 0.484U\$S/kW.h.

5 - Fuentes de energía alternativa en la región

Las fuentes de energía alternativa disponibles en la región podrían utilizarse en conjunto con el recurso geotérmico, de manera de aprovechar las características de las mismas. La satisfacción de los picos de demanda de potencia en un sistema basado en energías renovables suele ser un aspecto de difícil solución. El sistema dimensionado a los efectos de satisfacer los picos de demanda, resulta de una potencia nominal excesiva para satisfacer los consumos energéticos y no son factibles.

5.1 Aspectos Generales

En un sistema la energía se utiliza en sus diferentes formas como puede ser eléctrica, como para mover motores, iluminación, comunicación, computación, etc, térmica para calefacción, secado, maduración, etc., mecánica para bombeo de agua.

La disponibilidad de fuentes de energía convencionales, como lo son la energía eléctrica disponible en el sistema de distribución, o combustibles fósiles, puede dar lugar a una utilización extensiva e intensiva de la energía sin tener en cuenta la eficiencia con la cual se utiliza ni la racionalidad con la cual se conduce la energía. En un sistema que se manejan energías renovables debe atenderse con cuidado los aspectos antes mencionados. La utilización del recurso debe hacerse teniendo en cuenta la disponibilidad del mismo, debiéndose cuidar los consumos en momentos de escasez, y darle un uso amplio en casos necesarios en momentos de abundancia, contándose entre tales usos la acumulación de energía. También deberá utilizarse de acuerdo a la forma en la cual se dispone la misma. Por ejemplo, la energía eólica es una fuente de energía mecánica, por lo que su utilización es natural encauzarla como tal, como lo es el bombeo de agua, o bien para generar energía eléctrica. Esa energía eléctrica podría utilizarse de diferentes maneras, como ser iluminación, movimiento de motores, alimentación de diversos utensilios.

Sin embargo, el uso con fines térmicos da lugar a un uso no racional de la energía, pues es disipada a los efectos de obtener calor. Esta última utilización será más recomendable efectuarla con fuentes de energía en la cual se dispondría como calor o energía interna como lo son los combustibles fósiles, la biomasa, la energía solar o la energía geotérmica.

Un planteo similar se podría hacer a la inversa, es decir en sistemas donde se dispone energía en forma térmica, un uso racional de la misma sería utilizarla con fines térmicos como lo es el calentamiento de agua, calefacción, etc, mientras que el uso con fines mecánicos da lugar a que una importante cantidad de energía deba ser utilizada en el propio sistema de conversión. A modo de ejemplo, como se mencionara en el capítulo tercero, en una planta de generación de energía eléctrica utilizando la energía térmica de un reservorio geotermal tiene un rendimiento de menos del 30%, por lo que un 70% de la energía utilizada del reservorio es consumida en el propio sistema de conversión. Este hecho toma relevancia en la medida que el recurso sea escaso.

Otro aspecto que está vinculado al uso de las energías renovables es la de hacer un uso eficiente de la misma. Esto se refiere a disminuir la pérdida de energía utilizando dispositivos con alto rendimiento y adoptar prácticas que disminuyan las pérdidas.

Estas observaciones muestran la necesidad de realizar la capacitación de las personas que están vinculadas al sistema que utiliza energías renovables.

5.2- Fuentes de energía disponible

En la región existe una elevada disponibilidad de biomasa. Esta se dispone en diferentes formas, como son residuos agroindustriales (cáscara de arroz, aserrín, cáscaras, etc.) residuos de la explotación forestal y plantaciones de árboles. La instalación en la región de plantas procesadoras de madera con el objeto de producir pulpa blanca de madera o papel, conducirá a un aumento en los costos y a un descenso de la disponibilidad del recurso biomasa en la última modalidad. Sin embargo, la producción arroceras en la zona sur de la región, la producción de granos en la zona oeste y la producción de caña de azúcar en la zona norte da lugar a una abundante disponibilidad de biomasa. La peculiaridad de este recurso es que se tiene en forma concentrada y resulta costoso su transporte, por lo que la utilización debería hacerse en los sitios de producción del residuo. La utilización de este recurso en un sistema geotérmico podría permitir satisfacer los requerimientos de punta del sistema, lo cual permitiría dimensionar el sistema geotérmico para los requerimientos de base.

La energía eólica disponible en la región presenta un gradiente hacia el sur donde sería mayor. Sin embargo la existencia de singularidades de la topografía y de la rugosidad del terreno puede dar lugar a recursos más abundantes de lo esperado. El recurso eólico se puede concentrar en la zona costera aunque la existencia de colinas de suave pendiente, de lagos y de zonas de bañados puede dar lugar a zonas con velocidades de viento elevadas. En la zona sur de la región considerada existe experiencia y ejemplos de utilización de energía eólica. En Paraguay se están llevando a cabo algunas experiencias de utilización de energía eólica en zonas alejadas, aunque no es un país con elevado recurso eólico. En Argentina, Uruguay y Brasil existe un uso más extendido del recurso eólico a nivel autónomo. En la medida que la zona se desplaza hacia el norte, el recurso eólico se hace menor, sin perder de vista las consideraciones iniciales. Este recurso energético, especialmente en zonas alejadas de las redes de distribución de energía eléctrica, permitiría proveer energía mecánica para mover el equipo de bombeo o bien energía eléctrica para alimentar las necesidades de sistema de control,

La energía solar parece tener un gradiente opuesto al de la energía eólica. Es decir que hacia el norte se tendrán mayores radiaciones. En la zona sur, en promedio anualmente se dispondría de una radiación del orden de $600\text{W}/\text{m}^2$ con máximas de $800\text{W}/\text{m}^2$ y mínimas de $450\text{W}/\text{m}^2$. Se destaca que la radiación solar de referencia para el diseño de sistemas de conversión de energía solar es $1000\text{W}/\text{m}^2$, por lo que en la región sur los equipos tendrán una salida de potencia de entre 45% y 80% del nominal. En la zona norte, se podrá tener una radiación promedio de 800 a $900\text{W}/\text{m}^2$, por lo que los equipamientos en este caso tendrían una salida por encima del 80% del valor nominal. En este último caso la energía solar utilizada en forma térmica podrá significar un importante apoyo a un sistema de

calentamiento de agua. Algunas experiencias llevadas a cabo en el estado de San Pablo, Brasil, muestra que el calentamiento de agua de uso residencial puede ser efectuado en un 80% del tiempo con energía solar.

Los micro aprovechamientos hidráulicos aparecen como una alternativa para generar energía eléctrica especialmente en zonas donde la topografía permite disponer de elevados saltos hidráulicos, o bien donde existen accidentes topográficos que permiten hacer cierres de los cursos de agua reduciendo los costos de las obras civiles, que son las más elevadas en este tipo de emprendimientos. Un estudio efectuado en Uruguay, por parte de la Facultad de Ingeniería, sobre la utilización de micro, mini y pequeños atmosféricos mostró que la factibilidad de tales emprendimientos es fuertemente dependiente de la entidad de la infraestructura civil que debe ser construida, siendo pobremente dependiente del equipamiento electromecánico. Esta peculiaridad es semejante a la que presenta el recurso geotérmico en el cual el costo del pozo resulta la componente más significativa de la inversión inicial. La disponibilidad de este tipo de recurso energético resulta muy dependiente de las realidades locales, tanto por la topografía, como por la actividad existente en la región. Para estos últimos se destaca la realización de reservorios de agua con el fin de regar, cría de peces, actividades recreativas, etc, las cuales requieren la construcción de presas con conducciones destinadas a disipar energía en caso de excesos. En esas instalaciones sería factible instalar micro turbinas hidráulicas. Los micro, mini y pequeños aprovechamientos hidráulicos podrían complementarse con la utilización del recurso geotérmico aportando la energía mecánica o eléctrica que requieren los sistemas geotérmicos.

Los bio-combustibles han sido considerados en forma creciente en el tiempo. Merece ser destacado en Brasil el programa PROALCOOL que llevó a la sustitución de un 25% de la nafta utilizada en vehículos por alcohol producido a partir de la caña de azúcar. También se destaca la producción de bio-diesel a partir de oleaginosos, o bien de aceites residuales. Estos combustibles podrían ser factibles en escala adecuada, de acuerdo a la utilización y a la disponibilidad de tierras para la producción de oleaginosos.

6 - Posibilidades de utilización de la energía geotérmica en la región

En la región donde se localiza el Sistema Acuífero Guaraní (SAG) se desarrollan diversas actividades que requieren energía, en especial de tipo térmica, vinculada al agro, a la agroindustria, a diversas actividades desarrolladas localmente, así como en el sector residencial.

En un primer acercamiento al posible uso del recurso geotérmico se visualiza tres tipos de potenciales utilidades con posibilidades de éxito.

Un primer uso sería como calefacción directa, o bien a través de una bomba de calor, de procesos de secado de baja temperatura, el calentamiento de invernaderos o bien el calentamiento de agua para ser utilizada en diversos procesos. Entre los procesos de secado podrían mencionarse: el procesamiento de yerba mate, té y tabaco, en las provincias

argentinas de Corrientes y Misiones, el sur de Paraguay y la zona occidental del estado de Rio Grande do Sul, Brasil. En la zona sur del SAG se destaca la producción de cultivos bajo techo. También en los estados de Santa Catarina, Paraná y San Pablo existe potencial para tal aplicación del recurso geotérmico.

Una segunda potencial aplicación es la refrigeración, dadas las dificultades que puede tener mantener la cadena de frío en ciertas regiones del SAG, principalmente hacia el norte. En este caso se plantea analizar el uso de sistemas de absorción. Se destaca que estos sistemas pueden presentar valores de COP bajos y capacidades bajas para temperaturas inferiores a 80°C, lo cual mostraría la necesidad de un diseño apropiado para tales sistemas. Por otro lado, el uso del recurso geotérmico parece factible de ser utilizado en un ciclo de vapor que sea utilizado como refrigerador, que en algunos caso podría ser adecuado para este fin.

Una tercera aplicación que se entiende pueda ser factible en la región es la calefacción, ya sea en forma directa o con bomba de calor, en todas las comunidades. En casos aislados también se podrá considerar la refrigeración.

Debe destacarse que en algunas zonas serían factibles usos en cadena del recurso geotermal, a modo de ejemplo, se podría aplicar a la calefacción de invernaderos y a calefacción de residencias, pudiéndose utilizar el agua residual para riego.

El análisis de viabilidad se propone hacerlo en dos escalas.

Un primer análisis sería a gran escala manejando los valores relevados de temperaturas y profundidades del recurso geotérmico. A partir de tal información se podría sugerir, para las diferentes zonas el tipo de utilización viable, complementándose con los requerimientos de tal tipo de utilización, previendo posteriores afinamientos en el conocimiento del recurso.

Un segundo análisis se efectuaría a una micro escala, seleccionando algunas zonas dentro de la región ocupada por el SAG. En cada zona seleccionada se analizaría la viabilidad del uso del recurso en casos específicos, eventualmente considerando el uso en cascada del recurso energético, la utilización de fuentes de energía alternativa y se efectuaría una análisis de factibilidad en los casos seleccionados. Este análisis de viabilidad y factibilidad podría ser complementado con el diseño de un caso piloto

7 - Bibliografía

Andrew Chiasson “Residencial swimming pool heating with geothermal heat puma systems”, GeoHeat Center, tp117.

Merida, L “Curing blocks and drying fruit in Guatemala” GHC Bulletin, Diciembre, 1999

Culver, G, Lund, J, “Downhole Heat exchangers”, Geo-Heat Center, Vol. 20, Nro. 3, artículo1.

Chiasson, Andrew, “Greenhouse heating with geothermal heat puma systems”, Geo-Heat Center, tp118.

Rafferty, K., “Geothermal power generation, A primer on low-temeprature, small-scale applications”, Geo-Heat Center, 2000.

Rafferty, K., “Specifcacion of water wells”, ASHRAE Transaction, Vol. 107, Pt. 2, 2001.

ASHRAE, “Geothermal Energy”, A29, The ASHRAE Handbook CD, Fundamentals, 1998.

Dickson, M. and Fanelli, M., “¿qué es la Energía geotérmica?”, Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italia,