

|                     |             |
|---------------------|-------------|
| C. N. E. A.         |             |
| ARCHIVO FUNDACIONES |             |
| Nº<br>1             | AÑO<br>1977 |

00.77.12  
CNEA-NT 19/77

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
PRESIDENCIA DE LA NACION

"ENERGIA GEOTERMICA"

Recopilación realizada por Sara Volman de Tanis

Gerencia de Desarrollo  
Buenos Aires - Argentina  
1977

#### COMITE COORDINADOR DEL ESTUDIO

Sara Volman de Tanis: Coordinadora General.

Alfredo M. Hey y Carlos J. Lerch: Coordinadores Adjuntos.

Esta recopilación se realizó utilizando los trabajos del Ing. José E. Meza de Agua y Energía Eléctrica y del Dr. Italo B. Simonato de Yacimientos Petrolíferos Fiscales. La autora agradece al Ing. Meza los comentarios y observaciones que realizó a la versión original.

## PROLOGO

El presente estudio integra el Análisis de la Oferta Potencial Nacional de Tecnología en Métodos de Aprovechamiento de la Energía Generada por Métodos no Convencionales.

Se ha realizado en el marco del Programa de Transferencia de Tecnología de la O.E.A.

El objetivo general del trabajo consistió en analizar la participación de la industria local ya sea la privada como la estatal, en el aprovechamiento de la energía obtenida por métodos no convencionales. Los sistemas de generación se desagregan con el mayor detalle posible, determinando qué sectores tienen desarrollos propios y no divulgados que sean transferibles a otros sectores de actividades similares o sean aplicables a ellos.

Dicho análisis ha sido efectuado en base a los siguientes capítulos:

1. INTRODUCCION
2. ENERGIA EOLICA
3. ENERGIA POR FUSION
4. ENERGIA GEOTERMICA
5. ENERGIA POR HIDROGENO
6. ENERGIA MAREOMOTRIZ
7. ENERGIA NUCLEAR
8. ENERGIA SOLAR

Sara Volman de Tanis  
Responsable del Programa  
Transferencia de Tecnología

## 4. ENERGIA GEOTERMICA

### 4.1. Naturaleza del recurso

#### Energía Geotérmica

Podría definirse como la suministrada por el calor interno del subsuelo, que puede llegar a la superficie utilizando como vehículo el agua (líquida o vaporizada), a través de vías naturales, o abiertas expresamente por el hombre para su aprovechamiento económico.

Es bien sabido que dentro de la corteza terrestre la temperatura aumenta con la profundidad. Pero dicho incremento no es en general uniforme, es decir, el gradiente geotérmico no es constante.

Su valor promedio es de aproximadamente 3° cada 100 m. Pero hay zonas con anomalías geotérmicas, a veces muy pronunciadas, donde esos valores medios son apreciablemente superiores y que son las que encierran precisamente los yacimientos geotérmicos de valor comercial. En ellas el agua alcanza temperaturas más o menos elevadas, llegando en algunos casos a valores considerables (por ejemplo, en un lugar de California, casi 230°C en 3000 m de profundidad) y produciendo en superficie vapor sobrecalentado, sumamente adecuado para la generación de electricidad.

#### Distribución Geográfica

Las áreas potencialmente más favorables para la existencia de anomalías geotérmicas son en general regiones de formación de montañas y vulcanismos recientes (generalmente de edad terciaria o menor) y zonas vinculadas con grandes fracturas o fo-



En el centro del Atlántico, la faja de interés pasa por Islandia, Islas Azores, etc., hasta las Sandwich Australes.

Otra área favorable es la de fosas de Africa Oriental y la del Mar Rojo (Medio Oriente).

Existen además, zonas no vinculadas con orogénesis y/o vulcanismo jóvenes, tales como algunas cuencas hídricas, que contienen anomalías geotérmicas.

### Yacimientos Geotérmicos

Los yacimientos geotérmicos están constituidos como los hidrocarburos, por rocas recipientes y protectoras. Además podría hablarse también, en cierto sentido, de "rocas madres", que en este caso no originarían los flujos, sino que les proporcionarían el calor. Se trata de "rocas" en estado semiplástico, en las cuales el magma no enfriado totalmente, mantiene aún elevadas temperaturas. Se presentan en forma de cuerpos intrusivos que, aprovechando zonas de debilidad de la corteza terrestre, ascendieron a través de rocas preexistentes, alcanzando profundidades relativamente reducidas.

Estas masas intrusivas transmiten su calor remanente a las rocas en contacto con ellas y por conducción a otras superiores, entre las cuales pueden encontrarse las recipientes. Estas son rocas porosas y permeables que contienen agua y permiten su circulación bajo determinadas circunstancias.

Por encima de ellas se encuentran las rocas "protectoras" que impiden que el agua y los gases que eventualmente la acompañan, escapen totalmente hacia la superficie. En algunos casos se registran allí manifestaciones parciales, en forma de fumarolas, geysers, manantiales termales, etc., y en otros no existen en superficie indicios evidentes de la existencia en el subsuelo

de yacimientos geotérmicos, por actuar las rocas protectoras como "tapones" sumamente eficientes en forma similar a lo que sucede en los yacimientos de petróleo y/o gas.

PREVISIONES DE POTENCIA INSTALADA DE ENERGIA GEOTERMO -  
ELECTRICA A INCORPORAR ENTRE 1973-77

| PAIS           | Yacimiento       | Capacidad prevista<br>para 1977<br>(Kilovatios) |
|----------------|------------------|-------------------------------------------------|
| El Salvador    | Ahuachapán       | 30.000                                          |
| Guadalupe      | La Bouillante    | 30.000                                          |
| Japón          | Hashimanta-Onuma | 10.000                                          |
| "              | Matsukawa        | 22.000                                          |
| "              | Otake            | 11.000                                          |
| "              | Onuma            | 7.500 a 10.000                                  |
| "              | Onikobe          | 9.000 a 25.000                                  |
| "              | Kakkonda         | 50.000                                          |
| "              | Hatchobaru       | 50.000                                          |
| "              | Mori             | 50.000                                          |
| "              | Katsukonda       | 50.000                                          |
| Formosa        | Tatun            | 10.000                                          |
| Turquía        | Kizildere        | 30.000                                          |
| Estados Unidos | Salton Sea       | 50.000                                          |
| " "            | The Geysers      | 900.000                                         |
| México         | Cerro Prieto     | 75.000                                          |

TOTAL: 1.468.000

TABLA N° I

### Tipos de Yacimientos

De acuerdo con los fluídos que predominantemente contienen y/o producen, sin descartar otras posibilidades, los yacimientos pueden clasificarse en dos tipos principales:

#### Predominantemente vaporíferos:

Son denominados también de vapor "seco". Pero como en el reservorio normalmente coexisten vapor y agua, es preferible llamarlos en la forma indicada. En ellos el vapor constituye la fase continua que controla la presión, que es inferior a la hidrostática.

#### Predominantemente acuíferos:

Son más frecuentes que los vaporíferos y se caracterizan porque la fase que continúa en la formación es la líquida y en zonas poco profundas (de baja presión) el agua puede contener burbujas de vapor. La continuidad de la fase líquida se infiere por la distribución de presiones y por la abundancia de sustancias disueltas, que no poseen solubilidad significativa en vapor de agua de baja presión. Algunos de ellos pueden producir sólo agua y otros agua y vapor simultáneamente.

#### 4.2. Estado Actual del Conocimiento

##### Método de Exploración y Desarrollo

Son llamativamente similares a los utilizados para el petróleo y gas, por ejemplo: relevamientos y estudios geológicos, geofísicos, geoquímicos, perforaciones de exploración y desarrollo, tendido de cañerías de conducción, estimulación de formaciones, determinación y control de las condiciones de explotación, reinyección de fluídos en el reservorio, etc. Pero además de las corrientes en lo concerniente a los hidrocarburos, se emplean en la explotación geotérmica técnicas especiales, algunas de las cuales sólo son variantes de las utilizadas en la industria petrolera.

Entre ellas mencionaremos la denominada "sísmica pasiva", debido a que en este caso no se provocan artificialmente (mediante explosiones u otros métodos) vibraciones en las rocas del subsuelo.

Se detectan en este método microsismos naturales, que son movimientos menores y frecuentes producidos a lo largo de fallas geológicas. También se determinan "ruidos sísmicos", debido a que parece haber relación empírica entre la profundidad del reservorio, altos gradientes de temperatura y elevado nivel de ruidos sísmicos.

Se emplean mucho las técnicas geoelectricas (mediciones de resistividad desde la superficie) y electromagnéticas o inductivas. Son de utilidad, porque la conductividad tiende a ser mayor en los reservorios geotérmicos que en las rocas adyacentes, ya que la temperatura, salinidad, porosidad, etc., son normalmente elevadas, siendo mayor en los dominados por agua y menor en los de vapor.

La determinación de gradientes geotérmicos puede ser de utilidad para localizar regionalmente áreas de interés. Para estudios

de detalle y posible ubicación de pozos, es mucho más confiable la determinación de flujo calórico, ya que los gradientes no son constantes y son afectados por las diferencias de conductividad térmica de las rocas.

De acuerdo con la conocida ley de Fourier  $r = \frac{q}{K}$ , siendo  $r$ : el gradiente geotérmico,  $q$ : el flujo calórico y  $K$ : la conductividad, o sea  $q = r \cdot K$  por lo tanto, el gradiente geotérmico decrece cuando la conductividad térmica aumenta.

Las determinaciones hidrológicas, pues resulta esencial el balance hídrico del área en estudio, consisten principalmente en mediciones de temperaturas superficiales, caudales, análisis químicos, etc. y las geoquímicas incluyen también análisis, por ejemplo 50 pp m o más de cloro, indicarían en el subsuelo agua de alta temperatura. El contenido de  $\text{SiO}_2$  y la relación Na-K-Ca dan valores numéricos sobre temperaturas en el reservorio y la composición isotópica del H y O da indicios sobre el origen y proveniencia del agua.

Se emplean también técnicas incluídas en el grupo de los "Sensores remotos". Se trata en particular, de la termografía, que en principio permite diferenciar zonas con anomalías geotérmicas, de las áreas circunvecinas. Para ello se captan, mediante dispositivos especiales, las radiaciones infrarrojas emitidas desde la superficie terrestre. Estas radiaciones producen corriente electromagnética proporcional a su intensidad que ampliada y transformada en luminosidad, impresiona una película que gira a la velocidad del avión, las distintas tonalidades de la imagen varían con la temperatura de los lugares sobrevolados. Este sistema presenta, no obstante, grandes limitaciones por la influencia ejercida por la radiación solar, vegetación, humedad del suelo, evaporación, viento, etc., sobre la temperatura del suelo. Por ello sólo en casos muy favorables y

cuando la temperatura del área supera muy apreciablemente a las vecinas, este método resulta confiable.

En lo referente a perforaciones, las técnicas son similares a las de la industria del petróleo, pero las armaduras de surgencia son de mayor tamaño. Además dado el ruido ensordecedor, se utilizan en superficie amortiguadores "ad-hoc", en algunos pozos.

Los fluídos de perforación (inyección) y el cemento, deben reunir algunas características especiales.

Para incrementar la producción de agua y/o vapor, pueden emplearse también, como en el caso del petróleo y/o gas, técnicas de estimulación de formaciones (fracturación con o sin explosivos y eventualmente acidificación).

A fines de 1972 se realizaban trabajos exploratorios y de desarrollo en 20 países. Existía además interés por encarar tareas de exploración, en aproximadamente otros 30, entre ellos el nuestro, donde lamentablemente aún no se ha hecho casi nada en tal sentido.

En la Tabla N° 2 puede apreciarse la potencia instalada geotermoeléctrica en diversos países del mundo, en 1973, que llegaba a 1.096 MW. Es importante destacar que para tener dicha potencia, sería necesario consumir más de 3.600.000 m<sup>3</sup> de petróleo anuales, volúmen muy similar a nuestras necesidades de importación para el año 1974, o su equivalente calórico en otros combustibles fósiles o derivados.

Como puede observarse, a pesar de haber comenzado la explotación con unos 50 años de posterioridad, EE.UU. ha superado ya levemente a Italia en este campo de actividades y en un futuro próximo, dicha diferencia se incrementará sensiblemente. En la planilla de previsiones (Tabla N° 1) figuran las potencias

# POTENCIA INSTALADA GEOTERMoeLECTRICA (1973)

| País              | Yacimiento           | Año en que se inició la<br>producción comercial | 1973<br>capacidad<br>kilovatios |
|-------------------|----------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------|
| Italia            | Larderello           | 1912                                            | 365.500                         |
| Italia            | Monte Amiata         | 1959                                            | 25.500                          |
| Nueva<br>Zelandia | Wayr Akef Broadlands | 1960                                            | 170.000                         |
| Estados Unidos    | The Geysers          | 1960                                            | 396.000                         |
| Japón             | Matsukawa            | 1966                                            | 20.000                          |
| Japón             | Otake                | 1967                                            | 13.000                          |
| Rusia             | Pauzhetsk            | 1967                                            | 29.000                          |
| Islandia          | Namafjall            | 1969                                            | 3.000                           |
| México            | Cerro Pietro         | 1973                                            | 75.000                          |
| TOTAL             |                      |                                                 | 1.097.000                       |

TABLA N° 2

a lograr en 1977, mediante la habilitación de plantas en montaje y a construir. Ellas totalizarán 1.468 MW que sumados a los 1.097 considerados anteriormente, hacen un total de unos 2.565 MW.

Pero conviene aclarar, por otra parte, que las mencionadas estimaciones para 1977, deben haber sido modificadas apreciablemente después de producida la "crisis del petróleo".

En lo referente a posibilidades posteriores a 1977, el aporte de energía geotérmica puede ser realmente significativo, con relación a las demás fuentes de generación de electricidad para el próximo siglo.

Según algunas publicaciones, el potencial de un yacimiento geotérmico de Etiopía, determinado en base a fotografías con rayos infrarrojos, sería suficiente para producir toda la energía eléctrica que consume actualmente el continente africano.

En México se estima que el potencial del Cerro Prieto en el Valle Imperial sería de 20.000 MW (unas 10 veces más que la represa hidroeléctrica de Grand Coulee en EE.UU.). El yacimiento The Geysers de EE.UU. tiene un potencial estimado de 2.000 MW que será alcanzado en 1985.

Pero todas las estimaciones que se realizan variarán enormemente, si la técnica de generación de electricidad con agua caliente resulta de aplicación mundialmente conveniente y sobre todo, si los avances tecnológicos y la evolución de los costos de otras fuentes de energía hacen económico el calentamiento de agua, inyectada desde la superficie para la obtención de temperaturas adecuadas. La aplicación de aguas calientes en calefacción es de alta rentabilidad y evoluciona día a día.

Se piensa aprovechar así el calor existente en rocas "secas", es decir, que no contienen significativas cantidades de agua caliente o vapor, recuperables, en pozos de 3.000 m de profun-

didad o más.

Algunos proyectos contemplan la realización de explosiones atómicas para generar cavernas que actuarían como calderas, en dichas rocas secas. Otros se basan en la fracturación hidráulica de tales rocas, generando grietas que se agrandarían por acción de la contracción, al ser enfriadas aquéllas por el agua inyectada. Esta sería presurizada en superficie y mantenida en tales condiciones para evitar su vaporización, debido a que así transporta más calor hasta la superficie, que al estado de vapor.

En cualquiera de los dos casos se prevé utilizar dos pozos, uno inyector y otro productor, conectados con la formación.

La utilización de aguas calientes en lugar de vapor se aplica ya en escala no muy amplia en EE.UU. y la U.R.S.S., países que también trabajan activamente en el problema de las perforaciones profundas.

### 4.3. Posibilidades Regionales

De este panorama puede inferirse que las regiones del planeta con mayores posibilidades en lo tocante a geotermia son aquellas vinculadas al mencionado anillo de fuego, en particular el área de islas volcánicas pacíficas y sudasiáticas. En un rango menor aparece la cordillera de los Andes integrada por un amplio número de volcanes más o menos recientes, una buena parte de los cuales se hallan situados en la porción argentino-chilena de la cordillera a través de varios miles de kilómetros. Otro tanto puede decirse de la zona colindante con Bolivia, donde es dable observar en muchos lugares y en superficie, manifestaciones de actividad geotermal actual.

Aparte de las mencionadas áreas con neovulcanismo, donde se acrece la posibilidad de hallar anomalías con temperaturas superiores a los 200°C, existen otras zonas que presentan manantiales aflorantes o napas de agua caliente. Las más importantes en la Argentina son las situadas sobre una línea de unos 600 km, que partiendo de Orán se continúa en Rosario de la Frontera (Salta) y pasando por Tucumán y Río Hondo (Santiago del Estero) llega hasta la laguna de Mar Chiquita en el norte de Córdoba, con presencia de aguas termales (algunas de renombre terapéutico) cuyas temperaturas conocidas alcanzan desde más de 30°C y hasta los 60°C. Es también notable la presencia de agua subterránea en los entornos de Bahía Blanca a profundidades de 700 y 750 m. con temperaturas que han acusado hasta 75°C. Como dato curioso, este agua perfectamente potable abastece las redes de servicio público domiciliario, previo pasaje por torres de refrigeración, desde la primer década de este siglo. Pareciera pertenecer al mismo sistema la detección de temperatura en napas, hacia el sud de la mencionada ciudad y hasta más de cien kilómetros de la misma (p.ej. termas "Los Gauchos").

Si bien a través de diversos y dispersos documentos puede, quien acometa tal tarea, detectar quizás un centenar de localidades con presencia de aguas termales, nunca hasta el presente y según nuestro conocimiento, se ha ordenado y clasificado sistemáticamente esta información.

En forma reciente ha sido encarada esta labor, que habrá de permitir obtener un mapa geotermal del país. Estudios con fines energéticos tampoco se habían encarado, hasta que un par de años atrás se iniciaron campañas en este sentido, con un mayor esfuerzo volcado en "Copahue" provincia de Neuquén. Se trata de un volcán apagado cuyo cráter se eleva hasta los 2700 m sobre el nivel del mar, con una laguna interior (2400 m.s.n.m.) alimentada por un glaciar, con una escotadura por la que al descargar sus aguas da nacimiento al río "Agrio", emisario de una cuenca que descarga en el río Neuquén. Sobre la vertiente oriental de los derrames lávicos tienen lugar manifestaciones superficiales tales como fumarolas, en cuyo vapor se midieron hasta 136°C, desprendimientos de gases como ácido sulfídrico y afloramiento de aguas calientes de bajo Ph (netamente ácidas) de donde se ha tomado el nombre de Agrio (o ácido) con que se designa al río (presentando semejanza con el Big Sulphur Creeck en The Geysers).

También se han encarado estudios en Rosario de la Frontera, Salta, aunque de menor envergadura, y además se han efectuado reconocimientos en lugares que aparecen como muy promisorios, tales como los entornos del volcán "Domuyo" (notables perspectivas) de 4700 m sobre el nivel del mar, en Neuquén; "El Sosneado" de 5200 m.s.n.m. en Mendoza; "Villa Vil" en Catamarca; etc.

#### 4.4. Métodos de Aprovechamiento

##### Aplicaciones de los fluídos endógenos geotérmicos

Las principales son las siguientes:

- a) Generación de electricidad: que por su origen denominaremos energía electrogeotérmica o preferentemente, geotermoeléctrica.

Esta es la aplicación más importante y atractiva de los fluídos endógenos geotérmicos. Como es bien sabido, en las centrales termoeléctricas convencionales, la electricidad es generada mediante vapor, producido en calderas por calentamiento de agua con un combustible. Dicho vapor es suministrado en cambio, en las plantas geotermoeléctricas, por el yacimiento. Pero lamentablemente, los yacimientos que producen vapor en proporciones aprovechables, son menos frecuentes que los de agua caliente. Para poder utilizar también estas últimas, se han ideado ingeniosas tecnologías.

Es así que tanto EE.UU. como en la U.R.S.S. se utilizan ya dispositivos en los que el agua caliente cede temperatura, en un intercambiador de calor a un gas licuado de alta densidad y bajo punto de ebullición, vaporizándolo. Dicho gas (freón o isobutano) ya vaporizado, se utiliza en reemplazo de vapor para mover las turbinas, que a su vez accionan a los generadores de electricidad.

Si bien esta técnica es más costosa que la producción directa con vapor y se trata de procedimientos patentados en sus países de origen, puede esperarse su difusión en un período relativamente breve.

Es importante destacar que, en cualquiera de las variantes de producción de electricidad consideradas, no se requiere la instalación de calderas ni consumo alguno de combustible para generar vapor. Esto constituye una ventaja fundamental,

- con relación a las centrales termoeléctricas convencionales.
- b) Calefacción de ambientes y aire acondicionado: en centros de población próximos a los yacimientos geotérmicos (la distancia máxima está en relación con el enfriamiento que se produce a través de la conducción del fluido por cañerías), se utilizan estos sistemas de calefacción y enfriamiento ambiental. Como ejemplo podemos citar a Nueva Zelandia, Islandia, U.R.S.S. y Hungría.
  - c) Otros usos domésticos: cocción de alimentos, agua caliente para baños y lavados, etc. Estas aplicaciones son comunes en algunos lugares de Japón y otros países con yacimientos geotérmicos desarrollados.
  - d) Usos agrícolas y secados industriales: en varios países se elevan las temperaturas de invernáculos para el cultivo de plantas, con fluidos geotérmicos. Además se efectúan diversos procesos de secado, mediante el calor de origen geotérmico, incluso en nuestro país se lo emplea en una fábrica de pastas de Bahía Blanca.
  - e) Recuperación de minerales disueltos en el agua e incluso aprovechamiento de gases producidos junto con los fluidos hídricos en regiones volcánicas.
  - f) Balneoterapia: es quizás la más antigua de las aplicaciones, ya que existen numerosas menciones históricas, de la utilización de aguas termales con fines terapéuticos.
  - g) Desalinización de aguas: se logra mediante destilación instantánea, en instalaciones con presión inferior a la atmosférica, para reducir el punto de ebullición. El calor necesario es proporcionado por agua y/o vapor, provenientes del subsuelo.

### Ventajas y Desventajas

La tendencia mundial a desarrollar y explotar cada vez más estos recursos naturales, se basa en las siguientes ventajas:

- 1º) El calentamiento del agua y la generación de vapor son efectuados "gratuitamente" por la Naturaleza.
- 2º) Como hemos visto, en ciertos casos además de generarse energía eléctrica, pueden destinarse los mismos fluídos producidos a otros aprovechamientos de valor económico.
- 3º) La explotación de estas fuentes no origina desechos contaminantes de significación, como sucede por ejemplo con la energía atómica por fisión nuclear.
- 4º) Los recursos geotérmicos tienen carácter menos perecedero que con los combustibles fósiles, pudiendo en algunos casos considerarse prácticamente permanentes.
- 5º) Existen en el mundo numerosas regiones carentes o pobres en reservas de combustibles fósiles, pero dotadas de recursos geotérmicos significativos.
- 6º) No es necesario, como en aprovechamientos hidroeléctricos, inundar tierras, a veces fácilmente cultivables, o con posibles recursos mineros.
- 7º) Los costos de instalación y producción, se consideran en general inferiores a los de otras fuentes energéticas, excepto casos muy especiales y aislados de producción hidroeléctrica, como en Islandia.

Entre las desventajas pueden citarse:

- a ) Algunas aguas de desecho o descarga (efluentes) tienen más B,  $\text{NH}_3$  o As, que otras aguas superficiales o del subsuelo. Pero pueden ser reinyectadas a la formación, evitándose así la contaminación.
- b ) En ciertos casos la separación instantánea del vapor y el enfriamiento del agua, dan lugar a inscrutaciones de

$\text{SiO}_2$  o  $\text{CaCO}_3$ .

- c ) El carácter corrosivo de algunas aguas con  $\text{CO}_2$  o  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; sus consecuencias pueden evitarse mediante el uso de materiales adecuados.
- d ) El ruido de la surgencia, que puede reducirse fácilmente con amortiguadores.

#### 4.5. Tecnologías Disponibles, Transferibles y/o Desarrollables

Cuando ciertos indicios o manifestaciones superficiales permiten presumir la existencia, en un dado lugar de una anomalía geotermal, es posible en sucesivos pasos y con adecuadas técnicas, evaluar la probable potenciabilidad y características de la misma. Las sucesivas instancias pueden seguir el siguiente curso:

- a) Acopio de información existente si la hay, tales como mapas, cartas topográficas y geológicas, fotos aéreas, memorias que aporten datos tales como temperatura y composición de las aguas, etc.
- b) Procesado y análisis de lo obtenido según a), resumiendo en nueva documentación tras algunos pasos que pueden ser por ejemplo: interpretación fotogeológica; restitución aerofotométrica; identificación de elementos químicos indicadores, etc.
- c) En función de los resultados de b) programar un estudio del área en etapas sucesivas tales que cada una permita decidir sobre la conveniencia o no de profundizar el conocimiento mediante la siguiente etapa y de este modo regular los esfuerzos e inversiones, suspendiéndolos en el estado que se considere más conveniente. Dichas etapas pueden ser: geoquímica de aguas tendientes a identificar geotermómetros, o relaciones isotópicas termométricas que

permitan inferir temperaturas en profundidad; de gases para detectar la presencia de compuestos sulfurosos y orgánicos tales como hidrocarburos y/o amoníaco que delaten la existencia subterránea de sedimentos; de rocas, conjuntamente con análisis petrológico, que ayude en las formulaciones geológicas; auscultaciones geofísicas tales como sondajes eléctricos, gravimetría, sísmica inducida, microsísmica, sondeos magnetotelúricos, etc., que individual o conjuntamente permitan edificar hipótesis sobre la estructura y características físicas del subsuelo; termometría areal y en profundidades someras para la determinación de los gradientes térmicos en superficie y verticales, y determinación de flujos calóricos, etc. Todo esto se apoya en general en tecnologías propias desarrolladas por la industria petrolera. Es indispensable además alcanzar un modelo hidrológico que permita acotar reservas, recargas, etc., del sistema lo que ha de requerir la aplicación de tecnologías concernientes a los recursos hídricos, tales como determinación de cuencas aforos, permeabilidades, balances de agua superficial y subterránea, etc.

- d) Modelo general del sistema elaborado en base a las determinaciones anteriores tras la colaboración y discusión entre los especialistas de las diversas disciplinas intervinientes.
- e) Para el caso que las perspectivas de explotación del yacimiento sean halagüeñas y se tenga el propósito de confirmarlas se hace necesario encarar la parte más onerosa de la investigación, constituida por el o los pozos de exploración profunda, únicos capaces de evidenciar la estratigrafía y las condiciones reales del subsuelo, lo que permitirá ratificar o rectificar el modelo elaborado

y programar en base a una evaluación de la potencialidad del yacimiento, a las necesidades del mercado y a las disponibilidades económico-financieras, su explotación.

Estas etapas descriptas han sido parcialmente llevadas a cabo en el caso del estudio de la anomalía "Copahue" llegándose hasta la ejecución de un pozo que alcanza una profundidad de 975 m bajo boca de pozo. Dada la severidad de su clima, las campañas están circunscriptas a la temporada estival, contándose con acceso a partir de enero, y es posible operar hasta marzo. Es también durante el verano que funcionan las instalaciones y hospedajes en "Caviñhue", villa destinada al alojamiento del turismo que concurren principalmente por los baños termales.

Este estudio incluyó: restitución aerofotogramétrica, topografía de apoyo para dicha restitución y luego para las comisiones de campo, fotointerpretación geológica, todo esto en base a pares fotográficos de vuelos anteriores realizados con otros propósitos (plan Cordillerano) y fotografías desde satélites; relevamiento geológico de detalle; gravimetría y sísmica sin mayor resultado; geoquímica que permitió identificar las aguas superficiales, y en alguna medida inferir temperaturas en subsuelo; geoeléctrica de baja penetración (por carecer de equipos adecuados para intentar perfiles profundos) la que brindó escasa información; y termometría en una red de 17 perforaciones someras, la más profunda de las cuales alcanzó a 125 m.b.b.p., las que brindaron excelente información a pesar que las mediciones se realizaron con un equipo Amerada (de uso petrolero) cuya sensibilidad es inferior a la aconsejada para este caso. Se determinaron gradientes termométricos de hasta  $26^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , siendo lo normal del orden de  $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ . La temperatura inferida en el pozo profundo inte-

rrumpido en 1976 por razones climáticas se halla en el orden de los 250°C (lo medido en el barro de circulación, abajo, aún no estabilizado térmicamente fueron 223°C). Estos valores han corroborado la existencia de un yacimiento de rocas calientes (o anomalía geotermal) de altas temperaturas, secas en este estadio del conocimiento, pero con posibilidades de contener más abajo mantos permeables con presencia de agua bajo faz líquida presurizada; bajo faz gaseosa (vapor) o la mezcla de ambas. La roca atravesada en esta perforación estaba constituida en su casi totalidad por un paquete de estratos de coladas basálticas. En el área "Copahue" se hace necesario avanzar con los estudios que permitan una más completa y ajustada evaluación de sus características.

En el área Rosario de la Frontera se efectuó un operativo menos intensivo, utilizando fundamentalmente facilidades existentes por tratarse de una zona que ha sido y es investigada con propósitos petroleros. Los resultados al presente indican la existencia de mantos acuíferos con niveles térmicos por debajo de los 100°C, lo que limita el campo de su posible aplicación. De todas maneras, investigaciones más intensas podrían no sólo acotar sus posibilidades dentro de ese rango, sino también quizás hallar la fuente de su calor y verificar temperaturas más altas.

Las tecnologías empleadas en la investigación de yacimientos geotérmicos devienen en general con algunas adecuaciones de las técnicas exploratorias petroleras (salvo en todo aquello relativo a la hidrología) y el país cuenta con técnicos e implementación como para encarar estas labores e introducir avances en las metodologías operativas. En lo concerniente a hidrología también el país cuenta con los elementos humanos y equipamiento capaces de solventar el requerimiento, excepción

hecha de lo que se refiere a movimiento de aguas profundas, podríamos hablar de una hidrología subterránea profunda (hasta 2000 m o más), respecto de lo cual no hemos detectado la existencia de especialistas, siendo este aspecto de mucha importancia para la consecución de un modelo global geotérmico del área bajo estudio. También existe el anhelo de contar, en futuro próximo, en el campo de la geofísica y geoquímica en particular, con las nuevas técnicas nucleares de exploración que se están comenzando a aplicar en la búsqueda de petróleo, y cuya aplicación en investigaciones geotermales, consideramos pueden ser muy fructíferas y ventajosas.

Una vez determinadas las características de un yacimiento geotermal, y atento a los resultados adoptada la decisión de explotarlo, es necesario elaborar un plan de desarrollo del mismo, comenzando con las perforaciones productivas. Los pozos geotérmicos, principalmente en el caso de yacimiento dominado por vapor de agua, difieren en dimensiones (mayor diámetro) generalmente, en la forma y utilaje con los que se ejecutan y terminan, respecto de sus similares petroleros, asemejándose mayormente a los gasíferos. De todas maneras dadas las características propias, inclusive de cada yacimiento, de los pozos geotermales, se requiere aplicar técnicas acordes y singulares. La alta temperatura, la presencia de polvo rocoso abrasivo en el caso de vapor, o de sílice u otros elementos (p.ej. sales) disueltos en el caso de agua, y generalmente la de ácidos derivados del azufre, constituyen inconvenientes a ser salvados. Cabezales de pozo especiales, aislaciones térmicas, revestimientos anticorrosivos, eliminadores centrífugos de polvo (ciclones) y dispositivos como la "cola de lira" para alimentaciones, son algunos de los artificios que se usan en la batería en explotación, y que en

alguna medida condicen, conjuntamente con las condiciones del subsuelo (permeabilidades, etc.) la mayor o menor separación de pozos, y el número de éstos agrupados en una unidad colectora, por lo tanto obligan al uso de técnicas especiales para el desarrollo de un campo.

Cuando el aprovechamiento deriva en generación eléctrica, encontramos que: a) Las turbinas de vapor son especiales, más parecidas a las usadas varias décadas atrás, de baja presión, que a las actualmente desarrolladas de alta presión y temperatura, lo cual permite grandes potencias con dimensiones relativamente reducidas. La presencia en el vapor geotérmico de partículas y elementos químicos requiere materiales (aceros) especiales en partes de la turbina, en particular en los alabes. Los condensadores de turbina son también de diseño particular, no es necesario recuperar agua blanda para reenviar a la caldera y la torre de refrigeración difiere de las convencionales (el arrastre de compuestos con azufre obliga a protecciones especiales anticorrosivas, por ejemplo). La descarga del agua excedente (a la que evapora) puede constituir serio problema (aguas silicosas) solucionando a veces con técnicas de reinyección al yacimiento, lo que evita contaminación de cursos de agua superficiales y refuerza la realimentación natural (napas) del sistema geotermal.

También el utilaje eléctrico y electrónico de la central, playa transformadora y líneas, (si las hay), requiere tecnología novedosa cuando en la atmósfera circundante está presente el azufre en compuestos corrosivos. Locales cerrados con aire acondicionado y purificado, y metales especiales (nobles) en contactores de reles, son algunas de las soluciones ensayadas como nuevas técnicas de encarar esos problemas.

Como hasta el presente no existe en el país ningún campo geo-

termal en explotación actual o ya planificada, no ha habido oportunidad de aplicación de nuevas tecnologías usadas en otros lugares del mundo y en consecuencia de ellas solamente tenemos referencia.

### Costos

Los costos de instalación y especialmente de producción de varios tipos de energía, son difíciles de comparar. Los datos disponibles no siempre son exactos y dependen de las tasas de interés, impuestos, períodos de amortización, etc.

Pero en todos los casos se ha demostrado en Islandia, Nueva Zelanda, Hungría y la U.R.S.S., que la utilización directa de la energía geotérmica en usos industriales, agrícolas y calefacción, es apreciablemente más económica que el petróleo o derivados. La diferencia es menor con respecto al gas natural o carbón para calefacción y en cambio resultan mayor con relación a la producida para electricidad. El aire acondicionado se usa en la U.R.S.S. y en Nueva Zelanda y también resulta económico con relación a sistemas convencionales. En The Geysers (California) la geotermoelectricidad es más barata que la hidráulica, independientemente del tamaño de las plantas generadoras, a pesar de que las más grandes tienen a su favor la economía de escala.

En la Tabla N° 3 pueden apreciarse algunos datos de costos comparativos.

Para desalinización, el costo de Cerro Prieto (México) es de aproximadamente 1/8 que el de la planta Cayo Hueso (E.E.UU.). Lógicamente los costos disminuyen sensiblemente cuando el aprovechamiento es múltiple y/o en casos de grandes producciones.

## COSTOS COMPARATIVOS DE ENERGIA ELECTRICA

| Yacimientos                                   | costos<br>geotérmicos | costo promedio con<br>combustibles<br>(Petróleo y Carbón) |
|-----------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------|
| <u>Electricidad</u> (milésimos de dólar/KW.h) |                       |                                                           |
| Larderello, Italia                            | 4,8 - 6,0             | 7,5                                                       |
| Masukawa, Japón                               | 4,6                   | 6,0                                                       |
| Cerro Prieto, México                          | 4,1 - 4,9             | 8,0                                                       |
| Pauzhetsk, Rusia                              | 7,2                   | 10,0                                                      |
| The Geysers, EE.UU.                           | 5,0                   | 7,0                                                       |
| <u>Calefacción</u><br>(U\$S G/Cal)            |                       |                                                           |
| Reykjavik, Islandia                           | 4,0                   | 6,7                                                       |
| Szeged, Hungría                               | 3,0                   | 11,0                                                      |
| <u>Refrigeración</u><br>(U\$S G/Cal)          |                       |                                                           |
| Rotorua, N.Zelandia                           | 0,12                  | 2,40                                                      |
| <u>Secado</u> (de diatomita)<br>(U\$S/Ton)    |                       |                                                           |
| Namafjall, Islandia                           | 2                     | 12                                                        |

TABLA N° 3

Estos valores son de 1973

Para el caso de la Argentina, la respuesta podría alcanzar extensión amplia, pero en el estado actual del conocimiento del subsuelo nuestro relativo a las anomalías geotermales,

estaría encuadrada dentro del marco de las suposiciones. Por ejemplo, las diversas manifestaciones detectadas en la zona Copahue, se encuentran dentro de un rectángulo de 10 km de ancho por 20 km de largo, y su temperatura en profundidad se ha estimado en 250°C. A partir de estos valores, y sabiendo a conciencia que sólo se trata de esbozar una hipótesis de trabajo, pues se desconocen parámetros fundamentales, como ser permeabilidades, infiltración de agua, flujos calóricos, entalpía del sistema, etc., se puede anotar la siguiente acotación hipotética.

| Area                                                        | Muy optimista<br>100 km <sup>2</sup> | Moderada<br>30 km <sup>2</sup> |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Profundidad                                                 | 1.800-2.000 m                        | 1.800-2.000 m                  |
| Temp. fondo, °C                                             | 250                                  | 250                            |
| Temp. entrada turb., °C                                     | 200                                  | 200                            |
| Presión boca pozo, Kg/cm <sup>2</sup>                       | 10                                   | 10                             |
| No consensables, % peso                                     | 5                                    | 5                              |
| Prod.por pozo (vapor no cond.), T/h                         | 50                                   | 50                             |
| Potencia disp./pozo, MW                                     | 6,25                                 | 6,25                           |
| Sup.necesaria/pozo, Ha                                      | 30                                   | 80                             |
| Cantidad posible de pozos                                   | 333                                  | 38                             |
| Meta fija                                                   | 35% 115                              | 50% 19                         |
| Potencia total, MW                                          | 720                                  | 120                            |
| Utilización anual<br>(87%), $\frac{\text{GWh}}{\text{año}}$ | 5.470                                | 912                            |
| Potencia por Central, MW                                    | 100                                  | 100                            |
| Cantidad de Centrales                                       | 7                                    | 1                              |
| Puesta en marcha la.                                        | 1.980                                | 1.980                          |
| Veloc. crecimiento                                          | 2 centr./año                         | -                              |
| Meta cumplida                                               | 1.983                                | 1.980                          |
| Inversión perforación,<br>M U\$S                            | 92                                   | 15,2                           |
| Inversión conducción y<br>control producción, M U\$S        | 72                                   | 11,9                           |
| Inversión centrales<br>M U\$S                               | <u>123</u>                           | <u>17,5</u>                    |
| Total Inversión Fija,<br>M U\$S                             | 287                                  | 44,6                           |

TABLA N° 4

En el primer caso de la Tabla N° 4, con un desarrollo al 35%, estamos con un yacimiento que produce vapor equivalente a un yacimiento petrolífero que rindiera  $1,74 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  (aproximadamente  $41,5 \text{ m}^3/\text{pozo día}$ ) o sean 30.000 b.b./día yacim. Si a la inversión total le restamos lo correspondiente a centrales resulta:

$$\frac{(287 - 123) \cdot 10^8 \text{ U\$S}}{3 \times 10^4 \text{ b.b./día}} = 5.470 \text{ U\$S/b.b. día}$$

Un buen yacimiento petrolífero requiere una inversión del orden de los  $2 \text{ a } 4 \times 10^3 \text{ U\$S}$  para su desarrollo. Para malas condiciones puede alcanzar  $10^4 \text{ U\$S/b.b. día}$  y hasta los  $1,5 \text{ a } 1,8 \times 10^4 \text{ U\$S}$  por b.b. por día para campos de esquisutos bituminosos. Esto ubicaría, desde este punto de vista, a nuestra supuesta fuente energética, con un costo de 5.470 U\\$S, en una posición media interesante, considerando que la inversión involucra facilidades especiales y trae aparejado un ahorro de inversión en calderas, considerando su uso en generación eléctrica.