



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Estudios Superiores
" Cuautitlán "

LA GEOTERMIA COMO FUENTE ALTERNA DE ENERGIA EN MEXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A:

Juan García Figueroa

DIR. M. HUMBERTO GARIOS V.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"CUAUTITLÁN"

UNIDAD DE ADMINISTRACION
ESCOLAR

La Dirección a través del Departamento ha designado a ustedes señores profesores, para integrar el examen que se describe a continuación.

PASANTE: JUAN GARCIA FIGUEROA.

CARRERA: INGENIERO QUIMICO

PRESIDENTE: I. Q. MANUEL HUBERTO LARIOS VELARDE

VOCAL: I. Q. JOSE CABEZA FARRAC

SECRETARIO: I. Q. RAMON MORALES TORRES

1er. SUPLENTE: I. Q. ALVARO LEO RAMIREZ

2o. SUPLENTE: I. Q. ALFONSO RAMOS ANASTASID.

Atentamente.
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx., a 2 septiembre 1980.

QFB. MA. DEL PILAR RAMOS R.

PRR/smm.

INDICE 1

*CAP. I	<u>INTRODUCCION:</u>	
1.1.	Ubicación de la Energía Geotérmica en la problemática energética mundial.	3
1.2.	Que es la Energía Geotérmica?	7
1.3.	La Geotermia en las perspectivas Energéticas - Mundiales.....	10
*CAP. II	<u>ANTECEDENTES:</u>	
2.1.	Clasificación general de Fuentes de Energía.....	16
2.2.	Energía Geotérmica.....	17
2.2.1.	Antecedentes.....	18
2.2.2.	Origen.....	20
*CAP. III	<u>MÉTODOS DE EXPLORACION:</u>	
3.1.	Introducción.....	25
3.1.1.	Modelo.....	27
3.1.2.	Investigaciones Superficiales.....	29
3.2.	Geología.....	29
3.2.1.	Geología Subterránea.....	30
3.3.	Geoquímicos.....	32
3.3.1.	Hidrogeoquímica.....	32
3.3.1.1.	Geotermometría.....	37
3.4.	Introducción.....	41
3.5.	Geofísicos.....	43
3.6.	Pozos Exploratorios.....	44
*CAP. IV.	<u>RESERVAS Y RECURSOS GEOTERMICOS</u>	
4.1.	Tipos de recursos geotérmicos.....	46
4.1.1.	Vapor-dominantes.....	46
4.1.2.	Líquido-dominante (mezcla).....	49
4.1.3.	Rocas Calientes (petrotérmicos)	49
4.1.4.	Geopresurizados.....	50
4.2.	Potencial para generación.....	51
4.2.1.	Potencial mínimo comprobado.....	55
4.2.2.	Potencial inferido por geoquímica.....	56
4.2.3.	Potencial inferido por geofísica.....	57
*CAP. V.	<u>EXPLORACION</u>	
5.0.	Introducción.....	60
5.1.	Perforación, desarrollo y producción de pozos...	61
5.1.1.	Perforación.....	61
5.1.2.	Desarrollo y Producción.....	64
5.1.3.	Transporte de Fluidos.....	69

5.1.3.1.	Sistema de tubería.....	71
5.1.3.2.	Descarga de Pozos.....	72
5.1.3.3.	Separación de fases.....	72
5.2.	Ciclos térmicos en explotación geotérmica para - generación eléctrica.....	73
5.2.1.	Sistema de flasheo.....	77
5.2.2.	Sistema de Flujo Total.....	78
5.2.3.	Sistema de Flujo Binario.....	82
5.2.3.1.	Flujo de Trabajo.....	82
5.2.3.2.	Intercambiador de calor.....	83
5.2.4.	Sistema Híbrido fósil-geotérmico.....	86
5.3.	Planta Geotermoeléctrica de Cerro Prieto.....	90
5.3.1.	Inversiones.....	92

*CAP. VI. USOS NO CONVENCIONALES:

6.1.	Resumen.....	98
6.2.	Introducción.....	99
6.3.	Sistemas de calefacción y enfriamiento geotérmi- co de espacios, así como de calentamiento de agua	102
6.3.1.	Factores técnicos y Económicos.....	102
6.3.2.	Sistemas geotérmicos prácticos de calefacción y calentamiento.....	104
6.4.	Extracción de sales de Potasio y Litio a partir de la salmuera geotérmica desechada en Cerro --- Prieto.....	108
6.5.	Creación de Comunidades Planada y Complejo Quí- micos.....	121
	<u>CONCLUSIONES GENERALES</u>	127
	<u>BIBLIOGRAFIA</u>	131

V O C A B U L A R I O

Aguas Freáticas.- Aguas subterráneas de las capas más próximas a la superficie, las cuales se pueden hallar con un pozo ordinario (30 m.)

Campo Geotérmico.- Es el sistema geotérmico debidamente delimitado - y en el cual se considera la viabilidad de una explotación rentable.

Estrato.- Masa mineral en forma de capa de espesor aproximadamente uniforme que constituye los terrenos sedimentarios.

Ignimbritas.- Conglomerado volcánico formado por fragmentos de rocas

Inducción.- Procedimiento mediante el cual se inicia la extracción - de fluidos de un pozo.

Lignito.- Carbón pardo terroso que se originó al descomponerse vegetales sin presencia de aire.

Magma.- Flujo rocoso incandescente (a unos 1000 °C) compuesto de óxido y elementos volátiles que se encuentran en las zonas más profundas de la corteza terrestre; puede ascender o quedar aprisionada por movimientos de la corteza. En caso de llegar a la superficie, se habla de efusión, y si se solidifica dentro de la corteza, de intrusión. - Al ascender funde las rocas en contacto con ella (ciclo magnético).

Núcleo.- Compuesto de Tierra fundido formado especialmente por níquel y fierro.

Obturar.- Sellar o taponar

Pozo.- Conexión de la superficie con un yacimiento ya sea petrolífero, acuífero o geotérmico.

Prospección.- Conjunto de trabajos en orden a la búsqueda de testigos o a la explotación de yacimientos. La prospección geofísica consiste esencialmente en la medición de constantes físicas (densidad, características magnéticas, rigidez) de rocas del subsuelo.

Roca Ignea.- Roca de origen magmático.

Sedimento.- Depósitos de origen orgánico o químico fruto de la destrucción mecánica o de la alteración de las rocas, de las precipitaciones de elementos disueltos en el agua.

Sistema Geotérmico.- Es el conjunto formado por la fuente de calor -- fluido y zona cortical donde se almacena o circula el fluido.

Subducción.- Separación de placas tectónicas por donde penetra el magma

Tectónica.- Parte de la geología que se ocupa de la estructura de la corteza terrestre, en especial de las líneas de perturbación (sismos), plegamientos etc...

Tectónica de Placas.- Esta se puede explicar mediante el modelo representado por la fig. II.2 en el cual se muestra como la corteza terrestre consiste de una masa rígida (litosfera) la cual flota como bal

sa sobre una masa viscosa (astenosfera) la que se mueve en varios direcciones debido a corrientes convectivas lo cual ha originado - placas oceánicas y continentales que chocan o se separan dando lugar a regiones geológicas activas (volcanes, montañas, etc...). - Siendo tales interacciones y su estudio, el objeto de la tectónica de placas.

Toneladas Cortas de Carbón.- Es la tonelada métrica normal disminuida en aproximadamente 10%. Es decir, 0.907 toneladas métricas.

Yacimientos (Reservorio)- Acumulación o concentración de una o más sustancias útiles (fósiles, minerales, etc..) que pueden ser explotados económicamente. Se denominan primarios cuando se han formado --- originariamente a partir del magma o la roca eruptiva; y secundarios, cuando son el resultado de la alteración de los primarios en zonas superficiales de la corteza terrestre.

Columna litológica.- Son todas las capas de roca encontradas al perforar un pozo. Esta se determina mediante la medición de propiedades físicas de las rocas que pasa el pozo, y en relación con sus propiedades geológicas ejem. resistividad en relación con salinidad y fallas.

El Registro o sondeo eléctrico,-se basa en el estudio de las resistencias específicas aparentes de las rocas y de los potenciales del campo eléctrico propio a lo largo del pozo.

Registro gammas.- Basado en el estudio de los minerales radioactivos de las rocas detectadas por un aparato especial.

Bentonita. — Roca arcillosa procedente de tobas volcánicas que resiste al fuego y que además sirve para impermeabilizar suelos permeables. Se extrae de la montmorillonita que es un silicato de arcilla ($Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$) con MgO y CaO .

Las barrenas para perforar pozos profundos se dividen en:

- a) Frente continuo
- b) Columna (Para perforar con selección de núcleos)
- c) de diseño especial

Por su acción sobre rocas en:

- a) Cortantes
- b) Golpe
- c) Rotura

Por su diseño en:

- a) Alaves (de dos o tres). Se usan en rocas poco suaves y plásticas
- b) Conos (1, 2 o 3) para perforar rocas suaves-plásticas y plásticas-quebradizas de dureza media.
- c) de diamante. Para perforar areniscas, dolomitas, calizas (diseñadas para el método de turbina y rotatorias espirales, seccionales, escalonadas).

Todas independientemente de su tipo o diseño tienen un diámetro estándar.

La perforación de pozos con frente continuo usan barrenas de álaves esféricos y de diamante.

C A P I T U L O I

INTRODUCCION

"PARA MEJOR DESARROLLO DEL PROBLEMA ENERGETICO DEBEMOS USAR LA ENERGIA DE FORMA MAS EFICIENTE Y DIVERSIFICADA Y CON DISTRIBUCION MAS COLECTIVA DE SU USO E INGRESOS".

1.1. Ubicación de la Energía Geotérmica en la problemática energética mundial.

Dentro de la problemática mundial en los diversos campos, hay uno que ocupa un especial interés hoy en día, éste es el problema energético, alrededor del cual giran los demás problemas pues en él confluyen situaciones de relaciones políticas y económicas internacionales, de satisfacción de necesidades básicas para los millones de personas que viven en condiciones subsistenciales, readecuación de estructuras económicas de todos los países, posible agotamiento de recursos renovables, desarrollo y utilización de tecnologías -- nuevas, impacto adecuado en los sistemas ecológicos que conforman el medio ambiente, etc. Realmente el problema energético es uno de los más serios junto con el de la alimentación.

El problema energético como tal es nuevo pues no existen experiencias que puedan ser aprovechadas para resolver esta situación -- por lo que se hace imperiosa la necesidad de grandes dosis creativas e innovadoras considerando no sólo la posible sustitución del petró

leo en aspectos donde su utilización sea antieconómica, sino el tipo de desarrollo o modo de consumo que tiene la región o país.

Para México, la innovación tendrá que llegar hasta características más centrales del estilo de desarrollo que vienen siguiendo - los países del Tercer Mundo, que como el nuestro aspiran a un mejor nivel de vida. Dentro de esta renovación es donde las fuentes álternas como la geotermia en nuestro país pueden llegar (de hecho así - está sucediendo) a tener una gran trascendencia desde el punto de -- vista "transición" hacia el desarrollo pleno de tecnologías que aprovechen las fuentes no convencionales (solar, eólica, fitomasa, etc.) eficientemente de manera que equilibren esa demanda energética que - las fuentes convencionales como carbón mineral, petróleo, gas natu- ral e hidroelectricidad en un futuro próximo, dejarán de suministrar porque sus recursos no renovables (excepto hidroelectricidad) ten-- drán que agotarse. Es por eso, que el aporte que las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) tienen y tendrán en el abastecimiento de energía que contribuirá de gran forma a mejorar la calidad de vi- da de la población es tan importante, sobre todo si consideramos que en México la demanda de energía eléctrica es vital y crece constante mente en el país, y que la Energía Geotérmica puede generar electri- cidad suficiente como para en un futuro conectar su sistema a la Red Nacional de Distribución de Energía Eléctrica para hacer que millones de mexicanos se integren a niveles de vida mejores y que así se manifiesten en el mercado, pues es en la región central del país en don-

de más abunda el recurso (en el cinturón Neovolcánico), y en donde la concentración de población es mayor. Es necesario señalar que - sus aportaciones no solo están en el terreno energético, sino también en el no energético, donde pueden aportar sales para fertilizantes y otros usos domésticos y agrícolas que desde luego estarán resolviendo también problemas socioeconómicos nacionales.

Nuestras soluciones al problema energético pueden ser aprovechar, desarrollar y ampliar tecnologías de aprovechamiento de FNCE y Fuentes Convencionales de Energía (FCE), así como implementar el uso de técnicas de conservación de FCE que nos darán un período de transición, en el cual, las FNCE (de la que forma parte la geotermia en -- cierta medida) sustituyan a las FCE, donde éstas no son comerciales y en parte donde si lo son. Así, dicho período permitirá un desarrollo de equipos que utilicen FNCE y FCE más eficazmente y desde luego, que ello permita a nuestro país contar con un pluralismo tecnológico para que existan gran diversidad de respuestas a la múltiple cantidad de - problemas relacionados con el problema energético.

Considerando una advertencia la llamada crisis energética de -- 1973 y además la actual escalada de precios junto con la dependencia primordial de los hidrocarburos, como una amenaza que abre angustiosas interrogantes y exige urgentes transformaciones para satisfacer las demandas económico-sociales, puede uno preguntarse: ¿Hasta qué - punto México y los demás países deben continuar dependiendo de forma principal de una fuente energética agotable, de existencia limitada

y por ende, cada vez más revalorizable?, ¿Hasta qué punto nuestra República está en condiciones de incrementar su capacidad de oferta energética sobre la base de alternativas que no sean únicamente el petróleo y sus diferentes derivados?.

Estas preguntas hacen pensar en la necesidad de preparar una de las opciones, como lo es la geotermia, que permita abrir la etapa de transición hacia una economía que nos conduzca a una menor dependencia de los hidrocarburos, y se dirija hacia un mayor aprovechamiento de FNCE.

Las razones anteriores y la necesidad de cambio en el estilo de desarrollo actual mexicano (cambios que brinden satisfacción a necesidades básicas de la población) hace imprescindible un análisis de las posibilidades energéticas que tiene México en materia de FNCE y en especial, en lo referente a Energía Geotérmica, por ser dentro de éstas la más conocida de acuerdo con los estudios actuales y de la que se esperan buenas cosas en un futuro, pues aún no se ha explorado lo suficiente para saber su potencial energético real.

Este estudio más que nada busca presentar, a quien lo lea, un panorama general sobre la importancia energética principalmente y no energética que a nivel nacional tiene y puede tener la geotermia en los diferentes sectores doméstico, industrial y agrícola de nuestra población. Para lo cual contempla aspectos históricos de la fuente energética citada y su diversidad de usos que en el devenir del tiempo ha tenido; métodos de evaluación (exploración) de recursos y re-

servas, así como la presentación de técnicas para ello, y los diferentes campos que actualmente presentan excelentes condiciones --- energéticas y químicas para su explotación; procedimientos de explotación-extracción con las tecnologías propias como las del campo -- Cerro Prieto, único hasta ahora explotable; y finalmente, la utilización actual y futura que la geotermia tiene y puede tener en campos explotados y explorados por instituciones mexicanas hasta estos momentos.

Es decir que los objetivos fundamentales de la tesis son:

- a) Conocer la geotermia en terminos generales, o sea sus usos convencionales y no convencionales.
- b) Valorar la importancia Nacional del Recurso geotérmico como fuente energética.
- c) Proponer alternativas de utilización de la energía geotérmica (sobre todo aquella energía geotérmica implicada en -- usos no convencionales) para su uso más integral y justo.

1.2 ¿Qué es la Energía Geotérmica?

Definición: "La geotermia puede ser definida como el estudio de la distribución de temperaturas en la tierra y los fenómenos que influyen esta distribución". Jean Goguel.
(1)

Es la energía Geotérmica una de las formas más antiguas por su origen, pero más nuevas en cuanto a su aprovechamiento por el hombre. El término geotermia se refiere en sentido amplio al calor existente en el interior de la tierra independientemente de los factores que -

intervienen en sus manifestaciones termales.

El calor de la tierra normalmente está a grandes profundidades pero en ocasiones se encuentra en capas cercanas a la superficie, localizadas donde la corteza terrestre está fracturada. Es exactamente a través de estas fallas por donde las aguas de las lluvias se infiltran hasta entrar en contacto con capas calientes, lo cual eleva su temperatura. Dicha agua tiende a subir nuevamente a la superficie y al encontrarse con el agua almacenada en el subsuelo le transmite su calor. También existe el transporte de calor por conducción directa a través de las rocas, situación que origina lo que conocemos como yacimiento geotérmico.

La denominación de campo geotérmico implica consideraciones que afectan la relación y viabilidad de una explotación rentable. Para que el calor del subsuelo sea explotable, es indispensable que existan depósitos de agua subterránea (reservorio o yacimiento) que almacenen la energía geotérmica que hay en la roca, y una capa impermeable que impida su escape a la atmósfera. La acumulación de energía es mayor en cuanto más lento fluya el agua subterránea y las rocas que la cubran tengan un espesor mayor.

Por medio de pozos similares a los petroleros, la energía de esos fluidos subterráneos es canalizada a la superficie, donde el hombre puede beneficiarse de ella, a través de esos fluidos que pueden ser utilizados para generación de energía eléctrica u otros usos.

Los pozos geotérmicos deben atravesar los estratos impermeables superiores hasta llegar al reservorio y así comunicar la fuente de calor con la superficie, donde el hombre puede controlarlo por medio de una tecnología adecuada.

Cuando el fluido sale a la superficie puede estar en forma de vapor seco (dependiendo de la suficiencia del calor), de líquido -- (agua caliente) o mezcla de ambos.

La emisión de vapor de agua del subsuelo se relaciona con zonas de corteza débil o de intensa actividad volcánica, las cuales se manifiestan en gran cantidad en la costa del Pacífico y el Eje Neovolcánico de la República Mexicana. Referente al interior de la tierra hay muchas hipótesis respecto a sus altas temperaturas y gradiente de calor pero en realidad la única información obtenida es a partir de perforaciones exploratorias, gradientes geotérmicos y mediciones de flujo térmico.

Algunos autores piensan que las fuentes generadoras continuas de calor en el interior de la tierra se deben a materiales radioactivos como U, Th, K, ^{60}Co , además de otros factores como fricción, presión mecánica, empuje por mareas y reacciones químicas de algunos -- minerales. Sin embargo, la teoría más aceptada es la relacionada con tectónica de placas y/o vulcanismo que permite el flujo de magma --- (materia fundida) hacia la superficie calentando las formaciones superiores.

1.3. La geotermia en las perspectivas energéticas mundiales.

Dentro de la problemática energética mundial el impacto que la energía geotérmica tendrá en la escena de los energéticos no será significativa a corto plazo pero para nuestro país sí. Algunos expertos opinan que la energía proveniente de fuentes geotérmicas podrá cubrir el uno por ciento (1%) del total de necesidades mundiales de energía para la década de los 80s.⁽²⁾

Por la razón anterior la energía geotérmica no puede considerarse como fuente sustituta del petróleo sino más bien como un complemento de éste y las fuentes no convencionales que son inagotables y que se tienen que desarrollar en el futuro como solar, eólica, mareomotriz fitomosa etc.. Actualmente el petróleo cubre más de la mitad de las necesidades mundiales de energía y la capacidad geotérmica para generación eléctrica en el año 1976 fué del orden de 1400 MW lo que es equivalente a una gran planta que use combustibles convencionales (tabla I.1). El aprovechamiento geotérmico será más atractivo en países de escasos recursos fósiles o de abatimiento rápido de sus minerales.

El petróleo gradualmente será relevado de la carga de ser el principal combustible en generación de energía y por su carácter renovable solo debe encaminarse a la elaboración de productos químicos de mayor valor o donde de plano sea insustituible. La geotermia será importante después del año 2000 pues para ese entonces se espera que las tecnologías en prospección profunda y la perforación de -

Tabla I.1

PAIS	1976	1986
U.S.A	502 MW	5,000 MW
Italia	421 "	800 "
Nueva Zelandia	190 "	400 "
MEXICO	75 "	1,100 "
Japón	68 "	3,000 "
El Salvador	60 "	180 "
U.R.S.S.	5.7 "	---
Islandia	2.5 "	150 "
Turquía	0.5 "	400 "
Filipinas	3.5 "	440 "

 Generación geotérmica instalada en 1976 y estimada para 1986 en el mundo.

Tabla I.2

Campo Geotérmico	Producción Geotérmica	Promedio Local de otros combs.

Electricidad miles $\frac{\text{U.S.}}{\text{kWh}}$		
Namafjall, Islandia	2.5-3.5	-
Larderello, Italia	4.8-6.0	~ 7.5
Matsukawa, Japón	4.6	~ 6.0
Cerro Prieto, México	4.1-4.9	~ 8.0
Pauzhetsk, U.R.S.S.	7.2	~ 10.0
Los Geysers, U.S.A.	5.0	7.0
Calentamiento de espacios		
U.S. \$/Gcal de energía		
Reykjavik, Islandia	4.0	6.7
Szeged, Hungría	3.0	11.0
Refrigeración US \$/Gcal de energía		
Rotorua, Nva. Zelandia	0.12	2.40
Secado de diatomitas		
US \$/ton		
Namafjall, Islandia	~ 2.0	~ 12.0

 Datos seleccionados de costos comparativos de la Energía Geotérmica de Kruger & Otto, 1973. (3)

pozos a profundidades mayores haya mejorado.

Aunque existen impedimentos que pueden retardar el desarrollo rápido de esta fuente alterna, existen también estímulos para que suceda lo contrario, entre los cuales el principal es; el bajo costo, así como su limpieza y uso diferente al de generación eléctrica (tabla I.2). Se calcula que la energía eléctrica puede ser generada con energía geotérmica de forma más económica que a través de -- combustibles convencionales. Si bien el costo de la energía eléctrica a partir de sistemas de agua dominante u otros recursos como los petrotérmicos (roca seca caliente) y geopresurizados no pueden predecirse en la actualidad; se espera con bastante seguridad que -- serán altamente competitivos con el de otras tecnologías.

Otro factor estimulante es que ya se encuentran en operación -- varias plantas geotérmicas generadoras (tablas I.1 y I.2). Esto -- prueba la factibilidad de explotación y demuestra el hecho de que un campo geotérmico puede suministrar energía durante mucho tiempo sin disminución considerable en sus propiedades fisicoquímicas, térmicas y de presión.

Basados en el conocimiento presente, la utilización directa del calor terrestre puede ser más aceptable desde el punto de vista ambiental que otros tipos de energía. Parece ser que muchos países -- cuentan con recursos geotérmicos con potencial necesario para satisfacer grandes porcentajes de los requerimientos de energía en el futuro. El Dr. D.E. White del Servicio de Geología de EU (U.S.G.S.) ha

calculado que la energía térmica almacenada bajo la superficie terrestre a una profundidad de diez kilómetros, es aproximadamente de 3×10^{23} kilo-calorías. Esta energía es equivalente a 3.5×10^{20} KWh o al calor contenido en 4.5×10^{16} ton cortas de carbón. Por su lado la Comisión de Coordinación y Conservación de la Conferencia Mundial de la Energía. World Energy Resource, 1985-2020, con el propósito de revisar perspectivas para la utilización de la energía geotérmica en los próximos 50 años, ha estimado las reservas en 2.1×10^{24} joules para todas las naciones. Los recursos calculados para toda la masa continental a una profundidad de 3 km y temperatura superior a 15°C se estiman en 4.1×10^{25} joules; de estos solo el 2% tiene temperaturas suficientes para ser considerada en generación eléctrica (tabla I.3).

La recuperación global y eficiencias de conversión son también bajas, aún así, el potencial de generación eléctrica es sustancial: 1.8×10^{22} joules, del cual el 20% puede producirse mediante la tecnología actual 1.2×10^6 MW de capacidad eléctrica generada durante (2) 100 años. Lo anterior es suponiendo que todos los campos se desarrollen completamente.

En términos de calor total, el potencial para usos no eléctricos es mucho mayor que el destinable a generación (tablas I.4, 5, 6). Sin embargo el crecimiento referente a aplicaciones es al contrario, pues los usos eléctricos prosperan más rápido.

Quizá el aspecto más fascinante de la energía geotérmica es su

Tabla I.3

Fuente	Temperatura (°C)	Recurso base Joules	Potencial eléctrico Joules	Potencial térmico Joules
Bibliografía y cuestiona- rio.				
	Total	2.1E24		
Calculado.	<100	3.6E25	0	2.6E24
	100-150	3.8E24	0	2.7E23
	150-250	1.1E24	1.7E22	6.8E22
	>250	<u>7.3E22</u>	<u>9.0E20</u>	<u>3.5E21</u>
TOTAL		4.1E25	1.8E22	2.9E24

Disponibilidad total de recursos geotérmicos*

* " E " representa potencia de 10. Ejemplo 2.1E20 = 2.1 x 10²⁰

Tabla I.4

Región	<100°C	100-150°C	150-250°C	>250°C	Total
América del Nor- ta.	7.1E24	1.2E24	3.2E23	2.0E22	8.6E24
Centro- américa.	1.5E23	8.8E22	2.8E22	1.7E21	2.7E23
Europa Occ.	1.5E24	7.1E22	1.9E22	1.2E21	1.6E24
Sudamé- rica.	4.6E24	8.8E23	2.3E23	1.4E21	5.7E24
Europa Oriental.	6.7E24	2.5E23	6.3E22	4.0E21	7.0E24
Asia.	7.5E24	7.9E23	2.1E23	1.3E22	8.5E24
Africa.	5.2E24	3.3E23	7.0E22	9.4E21	5.6E24
Islas del Pacífico.	<u>3.3E24</u>	<u>2.6E23</u>	<u>1.7E23</u>	<u>1.0E22</u>	<u>3.7E24</u>
Total	3.6E25	3.8E24	1.1E24	7.3E22	4.1E25

Recursos geotérmicos calculados* (Joules)

* La notación E representa potencias de 10

Tabla I.5

Región	Potencial total E_h^* (Mwcan)	Capacidad de generación (MW)		
		1985	2000	2020
América del Norte.	2.3E5	35,000	106,000	212,000
Centroamérica	1.7E4	3,000	8,000	16,000
Sudamérica	2.6E5	40,000	117,000	231,000
Europa Occ.	1.7E4	3,000	8,000	15,000
Europa Oriental	7.2E4	11,000	33,000	65,000
Asia	2.3E5	34,000	100,000	200,000
Africa	9.0E4	14,000	41,000	82,000
Islas del Pacífico.	<u>1.9E5</u>	<u>30,000</u>	<u>90,000</u>	<u>179,000</u>
Total	1.1E6	170,000	503,000	1,000,000

Capacidad calculada del potencial de generación geotérmica.

* Porción de electricidad hidrotérmica obtenible mediante la tecnología actual; 20% del potencial de generación geotérmica total.

Tabla I.6

Región	1985	2,000	2,020
América del Norte.	3.4E14	1.3-2.9E14	0.8-1.7E16
Centroamérica	1.7E15	2.9E15	5.0E15
Sudamérica	-----	-----	-----
Europa Occ. Incluyendo Islas.	1.0E14	7.9E14	1.0E15
Europa Oriental	1.5-2.6E14	0.9-2.2E14	1.7-4.6E14
Asia	2.7E14	-----	-----
Africa	-----	-----	-----
Islas Pacífico	<u>3.4E13</u>	<u>5.0E13</u>	<u>8.3E13</u>
Total	2.5E15	5.1-6.9E15	1.4-2.4E16

Estimación para aplicaciones geotérmicas no eléctricas (J/d)*

* 8.64×10^{10} J/d = 1 MW

probable uso potencial en comunidades nuevas y planeadas que pueden desarrollarse cerca de los yacimientos al igual que los polos de -- desarrollo industrial, pues es aquí donde la energía emanada de los recursos geotérmicos representará un suministro virtualmente ilimitado de energía limpia y económica en la generación de electricidad y algunos otros usos no convencionales como su virtual aplicación en aguas para proceso industrial y extracción de sales de la propia salmuera.

También es importante mencionar el hecho de que potencialmente la energía geotérmica puede llegar a significar una fuente de gran duración de calor y electricidad si se logra comprobar como ya sucedió en algunos países que tienen el recurso (Nueva Zelanda, Japón e Islandia) el carácter renovable de sus acuíferos.

C A P I T U L O I I

ANTECEDENTES

2.1. Clasificación general de Fuentes de Energía.

Con respecto a las fuentes de energía, estas pueden ser continuas o renovables como la radiación solar, el propio calor terrestre, electricidad y magnetismo terrestre, las energías térmicas y mecánicas de las mareas, la del viento, hidroelectricidad, etc., y agotables o no renovables como los combustibles fósiles carbón, petróleo, gas natural, elementos desintegrables como uranio y plutonio, agreguemos a estos los esquistos bituminosos, la bencina natural, la madera (leña), residuos vegetales e industriales, caña, etc. Todas estas materias mencionadas constituyen energía natural condensada, en conserva, por decirlo así, que no ha sufrido transformación alguna -- desde su formación por lo que se les denomina fuentes de energía -- primaria.

Mediante técnicas diferentes, estas sustancias se pueden transformar en otros tales como: coque, briquetas de madera, alcohol de caña, la bencina y sus variedades, petróleo refinado y sus numerosos derivados, gas de alumbrado, combustibles sintéticos etc. que constituyen las llamadas fuentes de energía secundarias no renovables.

Esta primera clasificación sirve para ubicar a cada tipo de -- energético respecto a si es agotable o no; pero una segunda clasificación que es la más moderna y de amplia aceptación es aquella que --

se desarrolla en función del tiempo posible de utilización y su uso tradicional, como se muestra en el esquema II.1

2.2. Energía Geotérmica

2.2.1. Antecedentes.

La energía geotérmica es un recurso natural que se encuentra en todos los países del mundo. Los primeros usos que se le dieron fueron la calefacción ambiental y los baños medicinales, aprovechando sus altos contenidos de minerales; posteriormente se le ha -- aplicado en agricultura, calefacción industrial y doméstica, refrigeración doméstica e industrial, desalación y extracción. En la actualidad se está dedicando principalmente a la generación de energía -- eléctrica, aunque la calefacción ambiental e industrial continúan representando uno de sus usos más significativos en muchas naciones que buscan conservar sus combustibles fósiles y nucleares.

Los intentos para generar electricidad a partir de la geotermia se remontan a los inicios del presente siglo. El primer generador experimental de electricidad fue probado en Larderello, Italia (en 1904 y en 1913 se instaló una planta de 250 KW que se abandonó por -- carecer de éxito), aprovechando los flujos naturales del vapor geotérmico. En algunos países como E.U., Japón y Nueva Zelandia los intentos por desarrollar la energía geotérmica se emprendieron en los años 20s., pero no tuvieron éxito comercial sino hasta la década de los 60s., cuando en California, Estados Unidos, se perfeccionó la -

Esquema II.1

Fuentes Convencionales		Petróleo Gas Carbón Energía Nuclear (Fisión Nuclear) Hidroelectricidad Geotérmica (Hidrotermal)*
Fuentes Alternativas		Mediatas Futuras
Alternativas Mediatas	Escala Industrial	Alcohol de Caña (Caso Brasil) Mareas
	Sistemas Pequeños	Solar Fotovoltáicas Solar Térmico Biogas Eólica Micro generación (pequeñas caídas de agua) Mareomotriz
Alternativas Futuras		Fisión Nuclear Solar Térmico Solar Fotovoltáico Solar Químico Fusión Nuclear Gradientes Térmicos Oceánicos Calor Terrestre Electricidad Terrestre Electricidad Oceánica

* Convencional para países que ahora la explotan dentro de los cuales están: México, E.U., Japón, Islandia, Nueva Zelanda, El Salvador, URSS e Italia.

técnica para obtener electricidad por ese medio. En efecto en los Geysers se instaló una planta experimental de 12.5 MW.

En México los primeros estudios e investigaciones sobre el -- aprovechamiento del vapor del subsuelo para la generación de electricidad iniciaron alrededor de 1955, a lo largo del Eje Neovolcánico, en la parte central de el país.

Entre las diversas áreas localizadas con manifestaciones termales superficiales, se eligió para llevar a cabo estudios en detalle, la zona de Pathé, al oeste de la ciudad de Pachuca, Hidalgo, fué en ella que en 1959 se puso en operación la primera planta geotermoeléctrica con una capacidad de 600 KW. Allí se entrenaron los primeros técnicos y se obtuvieron las primeras experiencias en el aprovechamiento de ésta fuente de energía.

Con este inicio tan exitoso y por las características geológicas de nuestro país sobre todo en áreas volcánicas, se reforzó la idea de explorar y explotar comercialmente este recurso mediante arduos programas sobre ello, los cuales implican diversos estudios, -- trabajos e inversiones. Así se llegó a localizar los aproximadamente 310 focos termales en la República Mexicana, y lo principal -- fué que se logró explotar éste recurso en el Campo Geotérmico de -- Cerro Prieto, Baja California.

2.2.2. Origen.

La distribución de temperatura en la tierra se debe al flujo térmico que proviene de la energía calorífica almacenada en su inte-

rrior y que fluye por conducción ó convección (fluidos que la transportan) hacia la superficie, aunándosele otros tipos de energía térmica que es producida localmente.

La energía térmica de gran temperatura atrapada en las entrañas de la tierra, origina un flujo en dirección hacia la superficie (esto porque la experiencia ha demostrado que a medida que se perfora a mayor profundidad la temperatura se eleva y a este incremento se le da nomina "gradiente de temperatura" ó "gradiente geotérmico de temperatura". El cual es normalmente de $25^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ de profundidad, pero hay (2) regiones anormales que alcanzan hasta $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$) del orden de 2 H.F.U.- (Heat Flow Unit, en $\text{micro cal}/\text{cm}^2$) producto de la conductividad térmica de la corteza terrestre.

Otra fuente de energía térmica, es aquella producida por minerales radioactivos localizados principalmente en rocas graníticas, lo cual ha sido identificado como depósito térmico local. Ahora bien - una corteza granítica de espesor aproximado de 10 km generará radioactivamente suficiente calor para causar un flujo térmico superficial de 6. H.F.U. que comparado con la energía irradiada por la tierra nos da 3 veces el valor de su flujo de ésta.

Ello desde luego se debe a la concentración de minerales radioactivos y a las características y propiedades de los materiales graníticos.

El calor originado radioactivamente en la corteza se distribuye sobre un volumen relativamente grande lo que provoca que su tempera-

tura se vea disminuida y de un valor bajo, que lógicamente es menos útil que aquella energía geotérmica generada en el interior de la tierra, que está a una temperatura superior.

La acción que resulta de colisiones entre placas tectónicas - puede producir localmente temperaturas elevadas, suficientemente altas como para provocar la fusión parcial de las rocas (magma). Este fenómeno metamórfico es otra fuente de calor localmente producido en la litosfera en los límites entre placas tectónicas como se puede ver en la Fig. II.1

Analizando este flujo de energía térmica de 1 a 2 H.P.U. en la superficie terrestre producto de todas las fuentes geotérmicas y que se transporta por conducción, no es particularmente importante, pero lo es a profundidad donde las temperaturas alcanzan un orden de 500°C -1000°C.

Las corrientes convectivas en el manto terrestre conjuntamente con la actividad volcánica y la circulación interior hidrotermal -- constituyen el mecanismo de transporte que forma los depósitos hidrotermales cerca de la superficie. Lo anterior lo podemos explicar - con un modelo sencillo como el que proporciona Wahl (Fig. II.2), y que se constituye de la manera siguiente: Una masa rígida (litosfera) cuya densidad es relativamente baja (0.7 a 3.0 gr/cm^3) que flota como balsa sobre una masa viscosa (astenosfera). Tal balsa cortical - de movimientos variados producto de corrientes convectivas, en la --

FIG.II.1

PLUTONES FORMADOS POR SUBDUCCION

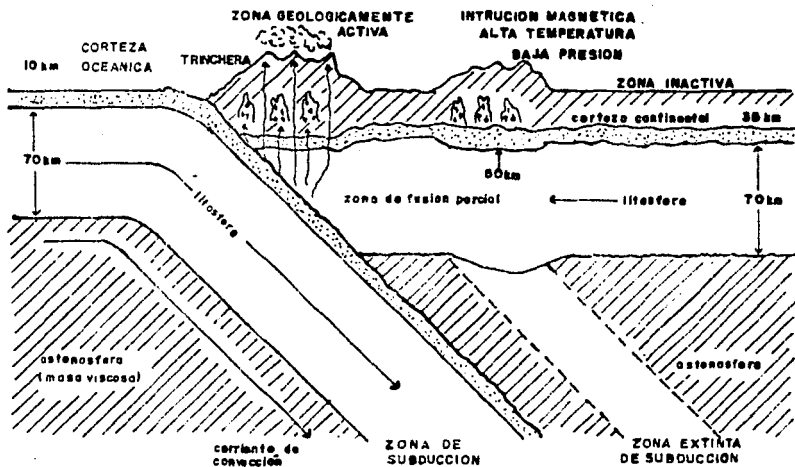
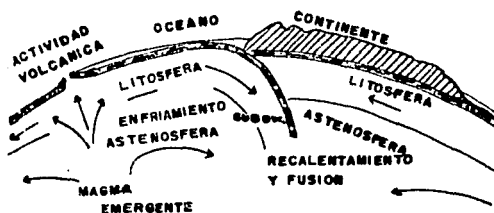


FIG.II.2

MODELO DE LA CORTEZA TERRESTRE



astenosfera, ha formado placas oceánicas y continentales que chocan o se separan originando regiones de interacción geologicamente activas en las cuales ocurre la subducción de placas, las erupciones las cuales son:

- a) Por separación de placas. El hecho de que la separación de placas corticales se mueva en direcciones opuestas en virtud de las corrientes convectivas en la astenosfera, - da como resultado un flujo de magma ascendente que se introduce en la litosfera y origina la actividad volcánica como se observa en las figs. II.1, 2.
- b) Por colisión de placas subducción. Las placas oceánicas que chocan con los continentes fluyen hacia abajo como se muestra en las figs. II.1 y II.2 originando la formación de trincheras oceánicas. Tales zonas geologicamente activas permiten la fusión parcial del material litosférico - dando lugar a intrusiones magmáticas que al fluir hasta - la superficie se manifiestan como volcanes.
- c) Por colisión de placas-obducción. El Plegamiento y engrosamiento de la masa cortical cuando una placa se mueve hacia arriba sobre otra se llama obducción. En tal movimiento se producen depósitos magmáticos, ejemplo de ello son Las Montañas Himalayas y Sierra Nevada.

Por medio de estos 3 procesos la energía térmica es transpor-

tada desde el interior de la tierra y almacenada en regiones proximas a la superficie de la corteza terrestre, donde el movimiento de fluidos en el subsuelo la toman para manifestarse en la superficie en forma de geysers, volcanes de lodos, fumarolas, manantiales, minerales hidrotermales ó bien alteraciones en las rocas, etc.

La circulación de agua subterránea a profundidades del orden de varios kilómetros, puede desarrollar un sistema convectivo donde el agua puede calentarse directa o indirectamente por medio de una cámara magmática a profundidades que oscilan entre 7 y 15 km y un rango de temperaturas del orden de 600°C - 900°C (Cannon Herman, 1977), para dar lugar a lo que conocemos como un sistema geotérmico. Desde luego que la durabilidad de las zonas magmáticas en lo que respecta al tiempo de enfriamiento dependen del espesor de estas y de los kilómetros que cubra, así hay algunas pequeñas que se enfrían en pocos años y otras que pueden permanecer energizadas durante miles de años.

C A P I T U L O I I I

M E T O D O S D E E X P L O R A C I O N

3.1 Introducción:

Las técnicas de exploración geotérmica en la República Mexicana han estado sujetas a cambios que van de acuerdo con los progresos tecnológicos instrumentales y electrónicos desarrollados. Inicialmente la exploración sólo se realizaba en aquellos lugares de manifestaciones hidrotermales superficiales (apoyada por estudios geológicos) con lo cual, se seleccionaban sitios para perforaciones de exploración. Hoy día se efectúan además, estudios geofísicos y geoquímicos, que permiten detectar reservorios geotérmicos, aún donde no existen alteraciones hidrotermales en la superficie.

Actualmente estas técnicas de exploración geotérmica usan la tecnología de la Industria Petrolera en su fase de desarrollo inicial, en lo que respecta a localización de áreas de interés susceptibles de ser exploradas con detalle. Sin embargo, hay diferencias en cuanto a yacimientos petrolíferos y geotérmicos (temperatura entre otros) las cuales hay que considerar en la discusión y evaluación de la metodología de exploración.

Los campos explotados o en fase de desarrollo, de hecho se presentan en lugares de actividad termal superficial, lo que motivó estudios geológicos y geofísicos en esas áreas culminando con perforación dentro de éstas. Recientemente el perfeccionamiento de las téc-

nicas exploratorias permite aplicar cierto procedimiento para obtener los mejores resultados posibles de éxito exploratorios en materia geotérmica.

Desde luego que el yacimiento debe contar con ciertas características para poder explorarse, por lo que resulta adecuado definir un Modelo de Yacimiento con sus dimensiones naturales probables y condiciones físicas con que debe contar, para así establecer un objetivo que el programa exploratorio deba alcanzar.

3.1.1. Modelo. Se desea obtener una producción mínima de 100 MW durante 20 años, o sea 2000 MW-año de energía eléctrica.

El potencial por unidad de volumen en una masa de roca caliente lo calculó Goguel (1970) y Banwell (1963). Goguel considera el caso en que el agua se evapora en el poro presente en la roca, y una disminución de temperatura de la roca de 250°C a 50°C, dando un resultado de producción realizable de 450 MW-Año por km³, lo cual es comparable con el contenido teórico de Carnot de 3,500 MW-Año. Si se enfría la roca sólo hasta 200°C de acuerdo con Goguel teóricamente daría 1,300 MW-Año de la energía de Carnot. Claramente se ven las diferencias, las cuales aparecen por las suposiciones hechas de carácter puramente ingenieril, donde el incremento del costo de la planta para usar el calor aún hasta una temperatura inferior, debe balancearse con el valor de la potencia eléctrica producida. Para nuestros propósitos asumiremos que el modelo de Goguel, enfriando la

roca hasta 50 °C, se debe duplicar sin elevar demasiado los costos de producción, y con la condición de que el volumen del yacimiento debe llenar el objetivo establecido de 2000 MW-Año, esto es, un volumen aproximado de 2.2 km³

Con objeto de visualizar mejor ello, podemos decir que este volumen podría contenerse en una región esférica de radio igual a 0.8 km, o una loza de espesor igual a 0.5 km y área de 4.5 km².

Estas dimensiones son las que debemos buscar como objetivo al explorar. Desde luego que los campos y sistemas grandes explorados superan fácilmente ello en 5 o 10 veces (en volumen).

Los estudios regionales tienen como objetivo la evaluación preliminar de las posibilidades geotérmicas a nivel nacional, mediante el análisis de la información existente (mapas geológicos y topográficos, imágenes de satélites, etc), y las investigaciones de reconocimiento y laboratorio conducen a seleccionar áreas de interés, a las cuales posteriormente se les define su prioridad en un programa exploratorio detallado (estudio de factibilidad), cuyo objetivo se dirige hacia la determinación de un modelo geotérmico preliminar tendiente a localizar sitios para perforación de pozos exploratorios -- profundos con diámetros correctos para pruebas de producción.

Tal estudio de factibilidad normalmente tiene dos fases subsecuentes:

FASE 1 (Reconocimiento)

- 1) Geología
- 2) Geoquímica (hidrogeoquímica)

FASE III (Detalle)

3) Geofísica

4) Pozos Exploratorios Profundos.

Estas fases se describen a continuación:

3.1.2. Investigaciones Superficiales:

Un recorrido por diferentes zonas, en donde se realizan observaciones de carácter superficial, representa el estudio inicial de - exploración de campos geotérmicos de los cuales se recaban datos de detalle tanto regional como localmente. En función del resultado de estas observaciones, se procede a efectuar levantamientos topográficos, mapeos y muestreos geoquímicos al considerarse atractiva su exploración y posible explotación que estas áreas puedan tener.

Desde luego que el esquematizar una secuencia óptima de estas investigaciones y nivel de detalle, no es posible, porque cada situación tiene sus particulares. Generalmente se utilizan combinaciones de relieves geofísicas de detalle y estudios geológicos y geoquímicos particulares, a la par con la exploración profunda (pozos).

3.2.1. Geología:

La geología ha sido de vital importancia en el proceso exploratorio y de desarrollo de campos geotérmicos. La geología estructural y litología también son herramientas útiles en tales propósitos.

La geología principia con la interpretación fotogeológica con el propósito de definir fallas, mapas estructurales volcánicos y de-

finir las relaciones vulcanotectónicas así como recopilar la información geológica existente. Continúa con el levantamiento geológico de detalle, cuyos objetivos son:

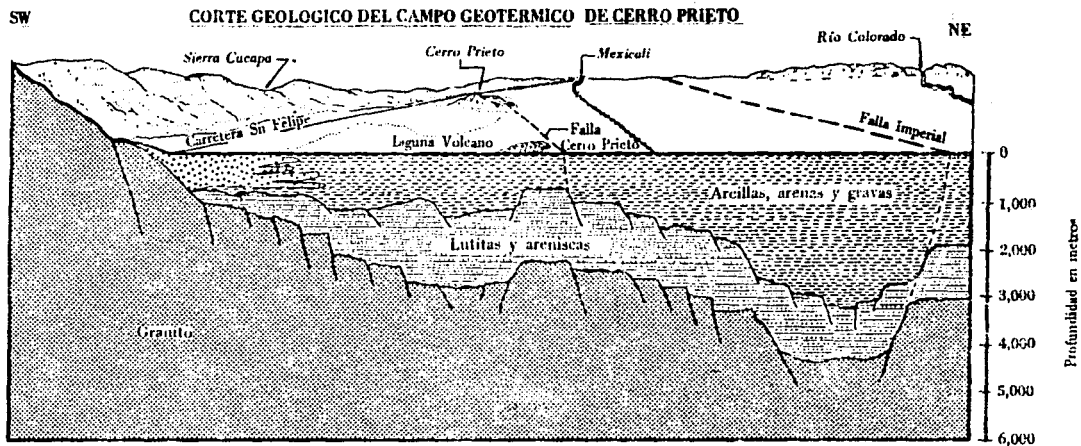
- a) Investigar la existencia de condiciones vulcanológicas que definan la posible existencia de un foco termal que explique la presencia de una anomalía térmica superficial.
- b) Identificar las formaciones de sello del sistema geotérmico, y - evaluar su efectividad.
- c) Recolectar información sobre la posible presencia de un yacimiento geotérmico.

3.2.1. Geología Subterránea:

Después que un pozo se perfora todos los datos recolectados (recortes, núcleos, registros geofísicos y litológicos, medidas de temperatura, etc), son estudiados con detalle, utilizando laboratorios para análisis y estudios especiales; así, se establecen (con las correlaciones de registros geofísicos y litológicos con las capas existentes en el campo) las principales estructuras geológicas sedimentarias, así - como las características de las formaciones perforadas. (Fig. III.1).

La síntesis de los conocimientos superficiales y del subsuelo representa el momento principal de la exploración del área, en el cual se define su modelo geotérmico. El proceso continuo de síntesis es - la guía conceptual de la exploración en la etapa de factibilidad, que determina ubicación, profundidad y número de pozos exploratorios a -

FIG.III.1



perforarse y el programa de investigación de superficie.

3.3 1) Geoquímica⁽⁸⁾

Definición: "La Geoquímica estudia las leyes de distribución de los diferentes elementos químicos y sus isótopos en los distintos medios geológicos, termodinámicos y fisicoquímicos existentes en la tierra en el pasado y en el presente, asimismo se extiende para el estudio del Consumo." (4)

Los estudios geoquímicos de reservorios geotérmicos involucran una gran variedad de temas que cada autor los presenta según su orientación; un ejemplo, es que lo que White (1970) y Ellis (1976) llaman Geoquímica, Mahon (1955) lo titula hidrogeoquímica, Mercado, Geoquímica hidrotérmica, etc. (5)

Como aquí nuestro interés está en analizar los elementos químicos y moléculas que trae el agua en solución producto de su estancamiento subterráneo, e interacción agua-roca, dirigiremos más nuestra atención hacia la hidrogeoquímica=geoquímica hidrotérmica, como parte de la Geoquímica ya que ello nos permitirá conocer la distribución y comportamiento de estos elementos químicos, mismos que con una interpretación adecuada de sus análisis químicos de aguas, gases y rocas nos permitirán definir un modelo preliminar de reservorio geotérmico.

3.3.1. Hidrogeoquímica (8a)

(8a) Definición: "La hidrogeoquímica es una rama de la Geoquímica aplicada, que trata de la interpretación de los análisis químicos de

las aguas, ya sean superficiales o subterráneas, y establece por medio de esa interpretación, su origen, mezcla y dirección de flujo, para el caso de aguas subterráneas, con respecto al cambio químico - de aguas superficiales, nos indica la influencia geológica de los medios que atraviesa".

En la etapa de factibilidad de la exploración, los estudios hidrogeoquímicos son utilizados para: (fig. III.2):

- a) Determinar la variación en el medio ambiente hidrogeoquímico, mediante la clasificación de la distribución y tipos de aguas y -- gases, de acuerdo a su composición química. Esto, da como resultado el agrupamiento de aguas superficiales, freáticas y termales según su composición química (Tabla III.1).
- b) Determinar el origen de la fase fluida, así como la (s) localización (es) de la (s) área (s) de recarga y acuíferos, mediante -- análisis isotópicos (hidrógeno y oxígeno).
- c) Reconocer la presencia de sistemas geotérmicos subterráneos y sus condiciones de temperatura/presión a través del estudio de las -- manifestaciones de fuga. (B, NH_4 , CO_2 , He, H_2S) y/o detectar anomalías geoquímicas resultantes de la liberación de vapor y/o gases geotérmicos en donde las manifestaciones superficiales no aparecen.
- d) Estimación de la distribución de temperatura en el "reservorio" -- mediante la utilización de varios geotérmómetros (SiO_2 , K/Na/Ca, -- Mg; isótopos ligeros estables).

DIAGRAMA DEL PROGRAMA HIDROGEOQUIMICO

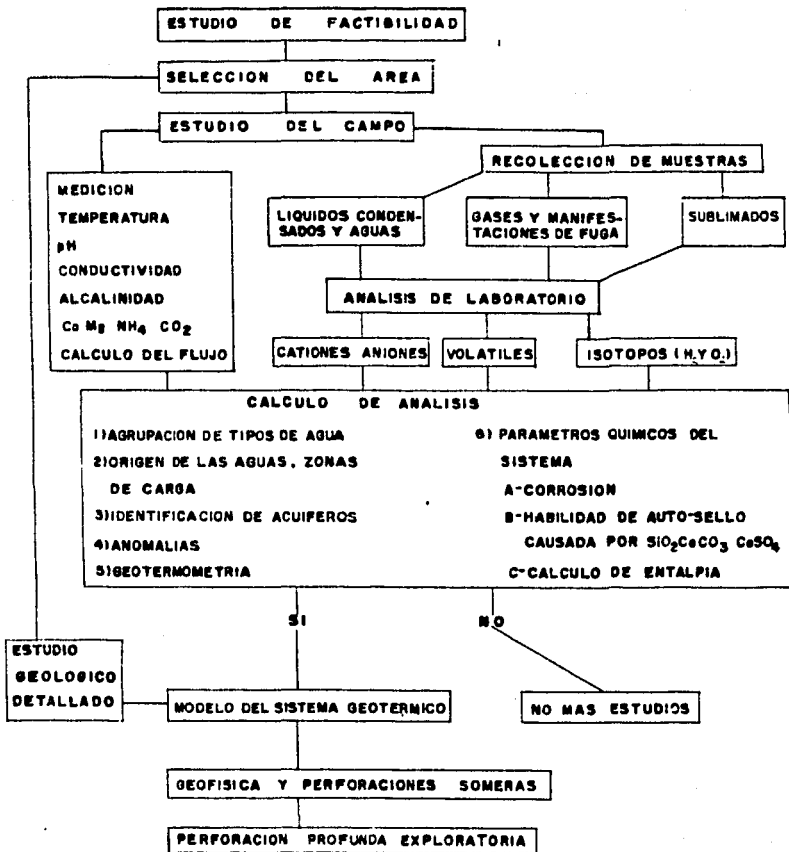


FIG.III.2

Tabla III.1

CLASE - 1

Af menor que Alc.

Salinidad Primaria	2 (Af)
Alcalinidad Primaria	2 (Alc - Af)
Alcalinidad Secundaria	2 (T)

CLASE II

Af igual a Alc.

Salinidad Primaria	2 (Alc) ó 2 (Af)
Alcalinidad Secundaria	2 (T)

CLASE III

Af Mayor que Alc; Af menor que Alc + T

Salinidad Primaria	2 (Alc)
Salinidad Secundaria	2 (Af - Alc)
Alcalinidad Secundaria	2 (Alc + T - Af)

CLASE IV

Af igual a Alc + T

Salinidad Primaria	2 (Alc)
Salinidad Secundaria	2 (T)

CLASE V

Af Mayor que Alc + T

Salinidad Primaria	2 (Alc)
Salinidad Secundaria	2 (T)
Salinidad Terciaria (Acidéz)	2 (Af - Alc - T)

Af= Acidos fuertes, SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- ; Alc = Na^+ , K^+ , Li^+ , NH_4^+ ,

T = Ca^{++} , Mg^{++} .

Los estudios hidrogeoquímicos se basan, como se mencionó, principalmente en el comportamiento químico de las manifestaciones hidrotermales de ciertas zonas de las cuales podemos obtener información característica de ellas por medio de métodos de análisis químicos -- tales como:

a) Volumétricos; b) Colorimétricos (espectrofotométricos) y --
(6)
c) De emisión de flama (Flamometría) . Estos métodos proporcionan la información química usada en geotermometría para determinar las temperaturas en la profundidad, así como también -- para delimitar el campo, y conocer componentes químicos de éste. Las determinaciones que durante la aplicación de los análisis -- químicos se efectúan cuando se usan en exploración geotérmica son:

- a) Temperatura, pH
- b) Acidéz y alcalinidad
- c) Bióxido de carbono, carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos
- d) Dureza total, calcio, magnesio, cloro total, flúor
- e) Sulfatos, sílice, amonio, nitrato, boro
- f) Sodio, potasio, litio, aluminio, cobre, fierro, plomo, manganeso, zinc.

Las muestras para análisis químicos se colectan en las manifestaciones termales de las zonas en estudio hidrogeoquímico, y su cantidad es de 1000 ml colocados en envases de polietileno cerrados y debidamente etiquetados con los datos de la muestra como son; sitio, estado de la muestra, temperatura, zona, pH, fecha y hora.

3.3.1.1. Geotermometría (Geotermómetros de $\text{SiO}_2, \text{Na/K}, \text{Na/K/Ca}$)

En los sistemas geotérmicos de agua caliente las temperaturas de profundidad del reservorio pueden ser estimadas conociendo - las concentraciones y las proporciones de tales elementos. Principalmente por mezclas de agua, se hace necesario utilizar ciertos factores de corrección. Por ejemplo, Fournier y Truesdell (1974) utilizan un método gráfico y analítico para estimar por medio del contenido de sílice la temperatura del subsuelo y la proporción de mezclas de agua caliente con agua fría (geotermómetro de SiO_2). El procedimiento es válido para manantiales calientes de gasto elevado, se basa en balances de calor y sílice, y se supone que no hay pérdidas de calor después de mezclarse las aguas, que el contenido de sílice es gobernado por la solubilidad de cuarzo en la profundidad, y que no ocurre de sílice durante la migración, obteniéndose excelentes resultados.

Otro método que usa la corrección es el geotermómetro ideado por los mismos autores quienes introdujeron la corrección del elemento Ca en la utilización de la proporción Na/K (geotermómetro de White y Ellis) para determinar la temperatura en la profundidad, también con buenos resultados. (Las ECS. de estos se muestran en el Cuadro III.1)

Para Cerro Prieto (Mercado 1965, 1968) se utilizaron índices químicos de Na/K , Na/Li y Cl/SO_4 para localizar zonas de máxima actividad geohidrológicas térmicas. La presencia de sales disueltas se debe a la interacción agua-roca, lo que concuerda con las leyes básicas de química, de el incremento de solubilidad con la temperatura de

CUADRO III.1

Ecuaciones para geotermómetros

A. Geotermómetro adiabático (SiO₂ en ppm) Fournier 1973
Cuarzo, Enfriamiento adiabático $\pm 2^{\circ}\text{C}$ de 125 a 275°C).

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{1533.5}{5.768 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$$

Cuarzo, enfriamiento conductivo ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ de 125 a 250°C)

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{1315}{5.025 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$$

Calcedonia, enfriamiento conductivo

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{1015.1}{4.655 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$$

B. Geotermómetro de Na/K (Na, K en ppm)
 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ de 100 a 275 White & Ellis.

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{855.6}{\log (\text{Na}+\text{K}) + 0.8573} - 273.15$$

Fournier & Truesdell (1973)

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{777}{\log (\text{Na}+\text{K}) + 0.70} - 273.15$$

C. Geotermómetro Na KCa (Na, K, Ca en Moles/litro)

Fournier/Truesdell (1973 - 1974)

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{\log (\text{Na}+\text{K}) + B \log (\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) + 2.24} - 273.15$$

B = 4/3 para $\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}} > 1$ y $t < 100^{\circ}\text{C}$

B = 1/3 para $\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}} < 1$ ó $t > 100^{\circ}\text{C}$

ciertos compuestos, por lo cual, así como la solubilidad de NaCl es diferente a la del NaSO₄ y teniendo un punto de equilibrio o saturación, igualmente los diversos compuestos de rocas y sedimentos tienen un índice de solubilidad y tienden al equilibrio individual o colectivamente. Esta es una de las bases principales de las variaciones en las proporciones químicas de los iones.

Una aplicación reciente de los geotermómetros, asociada a la actividad hidrotérmica en la superficie, es evaluar el potencial geotérmico de los campos. Para los campos de México, se efectuó una evaluación precisa dando un potencial geotérmico para el país entero del orden de 13 000 MW de capacidad instalable (Mercado 1976) ⁽⁵⁾ el cual puede incrementarse grandemente al explorar de igual manera los nuevos focos termales descubiertos hasta ahora (Circular 726 USGS 1975).

El análisis de gases de fumarolas, escapes de vapor y/o estanques burbujeantes, son al igual útiles en determinación de temperatura en la profundidad. Las reacciones de intercambio químico e isotópico de CO₂, CH₄, H₂ y agua se han utilizado como Geotermómetros. Molina (1976) usó por ejemplo el geotermómetro de Lyon-Hulton (modificado) para evaluar temperaturas en Los Azufres, por medio de análisis de gases de manifestaciones superficiales con excelentes resultados. (Tablas III.2, III.3) ⁽⁴⁾.

Las proporciones molares de gases como CO₂/H₂S, CO₂/NH₃, CO₂/H₂, etc. son indicativos de la temperatura en el subsuelo, de la migración del fluido en la profundidad y de las zonas de máxima actividad hidrotérmica.

Tabla III.2

ZONAS	Na/K	Temperatura °C	Na-K-Ca
Azufre	230		260
Currutaco	225		230
Chiflador	270		260
Pozo Hediondo	250		210
Ajolotes	230		210
Tejaminles	230		230
Puentecillas	240		185
Agua Fría	290		310
San Alejo	310		190
Laguna Verde	265		170
Marítaro	225		225
Cerro del Gallo	295		-
La Cumbre	265		-
Nopalito 1°	280		-
Nopalito 2°	265		-
Nopalito 3°	310		290
Espinazo del Diablo	280		-
El Chino	295		230
Eréndira y San Pedro	240		-

Tabla III.3

Zona	Temperatura
Azufres	297
Agua Fría	276
Laguna Verde	294
Marítaro	297
Cerro del Gallo	287
La Cumbre	316
Nopalito	312
Espinazo del Diablo	317
Eréndira, SanPedro	308

Un problema para la geotermometría, es el requerimiento de muestras bastante puras de los fluidos del reservorio. Los requisitos que se deben tomar en cuenta en la geotermometría incluyen: reacción insignificante del fluido con la roca durante su trayectoria hacia la superficie, de manera que su composición se mantenga equilibrada con el reservorio; ausencia de dilución o mezcla con otras aguas a niveles intermedios; y flujos rápidos del agua desde el reservorio hasta la superficie.

Fase III (detalle)

3.4 Introducción.

Entre los objetivos principales que persigue la ejecución de esta fase, están la determinación de las condiciones estratigráficas y estructurales del subsuelo, y la definición de un yacimiento geotérmico por medio de levantamientos geológicos y geofísicos más precisos, conjuntamente con los estudios geoquímicos y la perforación exploratoria profunda.

En base a los resultados de la fase I y los levantamientos geológicos de detalle, se desarrollará un programa geofísico que comprenda diferentes técnicas adaptándolas a las características geológicas y topográficas de cada prospecto geotérmico.

Una investigación geofísica consiste en un conjunto de mediciones ejecutadas sobre la superficie terrestre, en el aire y en el interior de la tierra. Las mediciones son de las variaciones en el --

espacio y el tiempo de varios campos de fuerza. Estos campos quedan determinados, entre otras cosas, por la naturaleza y estructura del subsuelo y debido a que las rocas varían ampliamente en sus propiedades físicas o porque al menos una de ellas muestra discontinuidades de un sitio a otro. Estas propiedades físicas incluyen aquellas tales como conductividad térmica, conductividad eléctrica, velocidad de propagación de las ondas elásticas, densidad y susceptibilidad magnética.

Los sistemas geotérmicos a menudo ofrecen discontinuidades en sus propiedades físicas que son fácilmente medibles, como el alto flujo térmico, baja resistividad eléctrica, atenuación de las altas frecuencias en las ondas elásticas, etc. La facilidad con la cual dichas discontinuidades puedan detectarse, dependerá del grado de contraste en las propiedades físicas de las rocas que comprenden el sistema geotérmico y la zona que le rodea. Una interpretación precisa y sin ambigüedad de los datos geofísicos, es posible únicamente donde la estructura del subsuelo es simple y conocida a partir de los datos de perforaciones. Sin embargo, esto no siempre se logra.

Los yacimientos geotérmicos usualmente tienen formas irregulares y ocurren en rocas de estructura compleja y de tipo variable. El énfasis de la exploración geofísica en la detección de sistemas geotérmicos recae en la determinación de las propiedades físicas relativas de las rocas, no obstante que la interpretación cuantitativa no sea muy precisa; con ella se puede obtener una indicación de la

calidad, tamaño y profundidad del sistema, así como la localización más adecuada de los pozos de exploración.

3.5. Métodos Geofísicos Empleados en la Exploración Geotérmica.

La investigación geofísica tiene en general dos objetivos: como auxiliar de la geología y para la detección y mapeo de yacimientos geotérmicos. Nos enfocaremos más en el último punto.

Es evidente que los yacimientos geotérmicos o sus alrededores inmediatos tienen ciertas características físicas especiales, que son susceptibles de detección y mapeo por métodos geofísicos.

Virtualmente las técnicas de investigación geofísica han avanzado en sensibilidad instrumental y precisión de las mediciones, al punto en que el ruido aleatorio de algún tipo o las variaciones irrelevantes de las cantidades que se están midiendo, tienen un efecto importante en la interpretación de los datos. Consecuentemente existe un interés creciente en los medios para eliminar o minimizar estos efectos no deseados y se han introducido técnicas de comunicaciones y otros campos para tal propósito. Algunas de éstas han tenido una importancia tal en la ganancia de sensibilidad y poder resolutivo de los instrumentos, que muchos de los tipos anteriores de equipos se han vuelto obsoletos mientras que ciertos métodos de investigación, que anteriormente habían mostrado poco éxito, actualmente son capaces de proporcionar información de la estructura y mecanismo de los sistemas hidrotermales.

Los métodos, geofísicos más usados en exploración de campos -- geotérmicos en México son: Eléctricos de resistividad, potencial natural, mediciones de gradientes geotérmicos y flujos térmicos, percepción remota, magnetotélúricos y gravimétricos.

3.6. Perforación Profunda Exploratoria.

Esta actividad, puede considerarse como la culminación de los trabajos previos de las exploraciones geológica, geofísica y geoquímica, y que nos lleva hasta un punto en que ya se tienen localizados puntos concretos para la construcción de pozos profundos exploratorios.

Por lo tanto, los estudios geocientíficos entran en ésta etapa -- como valiosos auxiliares de la perforación, además de que continuarán atentos a todos los datos que el pozo vaya proporcionando, para poder confirmar o reinterpretar en su caso, cada una de las curvas, temperaturas o predicciones que se hubiesen considerado. Es decir, que -- estrechamente ligada con la perforación deberán seguir laborando con juntamente todos los equipos técnicos de exploración.

Después de evaluar los resultados obtenidos en la fase de prefacibilidad, deberá proporcionarse un mínimo de 3 pozos localizados en -- los lugares con mejores posibilidades dentro de un área preseleccionada. La cantidad máxima de pozos a perforar y su separación dependerá de la extensión del área, de los resultados encontrados y de -- algunas condiciones especiales propias de la misma área geotérmica.

Esta técnica realmente nos proporciona datos propios del cam

po (tipos de campos productivos, delimitación del área, características fisicoquímicas del área, sitios del campo con máxima actividad - hidrotermal, potencial por pozo y del reservorio en general) los cuales nos permiten conocer el campo geotérmico mejor.

Finalmente anotaremos que la etapa de factibilidad, en otros términos la exploración, termina cuando se conoce bien el modelo geotérmico del área. Así con el modelo, más los datos del reservorio, nos determinaran la base física para definir el potencial del sitio y en caso de resultados favorables, las operaciones a realizarse en la etapa de desarrollo.

La determinación del potencial geotérmico es precisamente el objetivo del siguiente capítulo.

C A P I T U L O I V

RESERVAS Y RECURSOS GEOTERMICOS.

3.1. Tipo de recursos geotérmicos.

Los recursos geotérmicos pueden dividirse en cuatro clases de acuerdo con la clasificación más ampliamente aceptada; estos son: -

(1) vapor-dominante hidrotérmico, (2) líquido-dominante hidrotérmico, (3) petrotérmico (roca seca caliente) y (4) geopresurizados. Estos tipos se distinguen por sus características -- termodinámicas e hidrogeológicas (tablas IV.1).

4.1.1. Vapor-dominante

Estos sistemas por sus características fisicoquímicas y térmicas son poco comunes. No obstante, la mayoría de los desarrollos - geotérmicos económicamente favorables en la actualidad en materia de generación eléctrica se basan en sistemas asociados con los vapor-dominantes en el Mundo. En esos sistemas el vapor saturado es la fase de fluido continuo en la mayoría del espacio poroso de la roca.

Muchos investigadores suponen que en este tipo de yacimientos existe agua, ya sea en forma de gotas en los espacios porosos o en grandes volúmenes, en el fondo de dichos yacimientos. El rango típico de las temperaturas oscila entre 200 y 250°C; y la producción de vapor es relativamente simple, observándose generalmente que durante su extracción se registra un ligero sobrecalentamiento del vapor.

TABLA IV.1

**Países con potencial geotérmico en exploración y/o explotación
(Clasificación por Tipos de Reservorios)**

P A I S	C A M P O	U S O	CAPACIDAD INSTALADA MW (1979)
1. VAPOR (200 a 250°C)			
Italia	Larderello	Gen. Eléctrica	420
	Monte Amiata	Gen. Eléctrica	
	Travele	Gen. Eléctrica	
E.U.	Los Geysers	Gen. Eléctrica	512
Japón	Matsukawa	Gen. Eléctrica y Calentamiento	20
2. AGUA SUPER CALIENTE (200 a 350°C)			
Nueva Zelanda-Wairakei		Gen. Eléctrica	195
	Kaweraw	Gen. Eléctrica y Calentamiento	5
	Rotorua	Calentamiento	
Japón	Otake	Gen. Eléctrica y Calentamiento	11
	Onikobe	Gen. Eléctrica	25
	Onuma	Gen. Eléctrica	10
	Hatchobaru	Gen. Eléctrica y Calentamiento	50
	Kakkonda	Gen. Eléctrica y Calentamiento	50
	México	Cerro Prieto Loz Azufres	Gen. Eléctrica (En exploración)
San Salvador	Ahuachapan	Gen. Eléctrica	60
Rusia	Paushetska	Gen. Eléctrica	5

Campos en exploración de este tipo se tienen en: Chile (El totio), Nicaragua (Momotambo), Turquía (Kezildere, Afyon), Kenia (Olkaria), -- Guadalupe, Filipinas (Tiwi), EU (Brady, Valles Caldera, Niland, Brawley, etc.), Indonesia, India, etc.

Tabla IV.1 (Cont.)

Países con potencial geotérmico en exploración y/o explotación
(Clasificación por tipo de reservorios)

P A I S	C A M P O	U S O	CAPACIDAD INSTA LADA MW (1979)
3. AGUA CALIENTE (70-200°C)			
México	Extlán Los Negritos San Marcos La Primavera etc.	En exploración En exploración En exploración En exploración	
Rusia	Maikop Cherkenk Grozny Kuldur, etc.	Calentamiento, Agricultura, Minería, etc.	
E.U.	Boise Klamath Falls East Mesa, etc.	Calentamiento Calentamiento Generación	10
Islandia	Reykjaik Myvatn	Calentamiento Industria	3
Hungría	Hungarian Basin	Calentamiento, Agricul tura	
Francia	Melun	Calentamiento, Agricul tura.	
Japón	Shikabe Minamiizu Beppu Kikonoe, etc.	Agricultura, Salinas Agricultura, Herbaria Calentamiento, agricul tura Extracción azufre	

4. ZONAS GEOPRESURIZADAS (~ 300°C)

Hungría	Calentamiento
Francia	Calentamiento
E.U.	
México	

Además de estos países se tienen clasificados 70 más con zonas de alteración hidrotermal.

4.1.2. Líquido-dominante.

Tales sistemas se caracterizan porque la cavidad porosa que los contiene está llena de agua (o salmuera), la cual circula por convección al recibir la energía calorífica de la roca madre subyacente a la salmuera. Las temperaturas típicas en la salmuera varían desde valores cercanos a la temperatura ambiente hasta cerca de 360°C.

Las exploraciones han revelado que los recursos hidrotermales cercanos a la superficie terrestre, es decir, los sistemas líquido-dominante, son mucho más abundantes que los vapor-dominante. En las mejores regiones líquido-dominante, la temperatura se incrementa rápidamente con la profundidad, pero es casi constante en el cuerpo principal del yacimiento debido a los flujos convectivos y a la transferencia de calor. El fluido del yacimiento está saturado con agua y sometido a presiones hidrostáticas.

4.1.3. Recursos petrotérmicos (roca seca caliente o derretida).

En este tipo de yacimientos se supone que existe mucho más calor almacenado en la roca madre que en la salmuera que se encuentra circulando. Debido a que la porosidad generalmente decrece y que la temperatura se incrementa con la profundidad, es probable que existan amplios volúmenes de roca seca caliente a grandes profundidades en la corteza terrestre, ya sea como roca sólida o fundida. Se han investigado algunos métodos para introducir agua fría dentro de los sistemas de rocas calientes, ya sea a través de fracturas naturales o artifi-

ciales, a fin de aprovechar ésta energía.⁽⁷⁾

4.1.4. Yacimientos geopresurizados.

Estos recursos se localizan en estratos sedimentarios profundos, donde la compactación ha tenido lugar a través de varios periodos geológicos y donde se han formado sellos efectivos de lutitas. - En estas condiciones el agua es forzada a salir de la matriz lutítica y atravesar los cuerpos arenosos contiguos, por lo cual se comprime en forma conveniente por medio de la presión hidrostática de los estratos superiores llegando en ocasiones a alcanzar la presión litostática (presión que tienen las rocas en el fondo).

Estos sistemas se caracterizan por tener temperaturas más altas que las normales, pudiendo ser del orden de 237°C, como es el caso de los yacimientos situados a lo largo de la costa del Golfo de México en EU, cuyas presiones superficiales superan fácilmente los 770 Kg/cm² manométricas en la cabeza de el pozo. Por otra parte, -- las aguas geopresurizadas o soluciones de aguas saladas contienen -- típicamente gas metano disuelto, probablemente al punto de saturación en muchos casos, las cuales pueden ser económicamente importantes como fuentes futuras de hidrocarburos.

Hasta el presente la factibilidad técnico-económica no ha sido bien definida para los recursos líquido-dominante, petrotérmicos y geopresurizados. Sin embargo, se prevé que los recursos geotérmicos de estos tipos tendrán una participación cada vez mayor en el panorama de oferta de energía pues las necesidades de consumo de ésta obli-

garán a ello.⁽²⁾

4.2.- Potencial para generación eléctrica.

A pesar del desarrollo tecnológico mundial, aún no existe un procedimiento de evaluación del potencial geotérmico de un reservorio de manera precisa, debido a la gran variedad de factores que participan en el intercambio de energía calorífica del subsuelo. Sin embargo, para tener un orden de magnitud de la energía eléctrica que pueda obtenerse a partir de la energía geotérmica, se han realizado diversos tipos de evaluación que han determinado el potencial comprobado y el potencial inferido por los distintos estudios de exploración.

De acuerdo con los estudios exploratorios existen actualmente 310 focos termales en la República Mexicana (tabla IV.2) de los cuales según estas técnicas aproximadamente 130 tienen posibilidades de explotación (Mapa IV.1). Para algunos de estos focos termales el potencial se presenta enseguida (Tabla IV.3).

Cabe hacer notar que tales evaluaciones son altamente restringidas, dado que se consideran los campos geotérmicos como sistemas cerrados al flujo térmico e hidráulico, pues los estudios geohidrológicos y termodinámicos que se han realizado, indican la existencia de recarga hidrológica y de flujo térmico consecuentemente en magnitud suficiente como para asegurar que el recurso geotérmico natural es renovable, y que en realidad tenemos un potencial mayor que el determinado por técnicas geoquímicas y geofísicas en ese modelo simplifi-

TABLA IV.2

MANIFESTACIONES TERMALES DE
LA REPUBLICA MEXICANA

AGUASCALIENTES

- 1) El Salitre
- 2) El Sarcillo
- 3) La Cañera
- 4) Los Atellabos
- 5) Los Negritos
- 6) Ojo Caliente
- 7) San José de García
- 8) Aguas Calientes
- 9) Amentas
- 10) Charro Azul

BAJA CALIFORNIA NORTE

- 1) Agua Caliente (Ensenada)
- 2) Agua Caliente (Tijuana)
- 3) Aulheras
- 4) Cerro Blanco
- 5) Cerro Prieto
- 6) Ensenada
- 7) Escalerillas
- 8) Río Tijuana
- 9) Jacumba
- 10) Laguna Salada
- 11) El Carrizo
- 12) La Misión
- 13) La Puerta
- 14) Real del Castillo
- 15) Ritiro
- 16) San Borja
- 17) Bahía de San Luis
- 18) Guerrero Negro
- 19) El Alamo
- 20) Punta Banda
- 21) Santa María
- 22) Cañón de Guadalupe

BAJA CALIFORNIA SUR

- 1) A.C. de Santiago y San Jorge
- 2) A.C. Las Vírgenes
- 3) A.C. del Romero
- 4) Aguaitilo
- 5) Buenavista
- 6) La Paz

DURANGO

- 1) Animas
- 2) Mezquital
- 3) Tepahuates
- 4) Alamillo
- 5) Atotonilco

- 6) Atotonilco Ego. Papasquero
- 7) Cieneguilla
- 8) Coehinera
- 9) Corral de Piedras
- 10) El Carmen
- 11) Hervideros
- 12) Jacales
- 13) Jesús María
- 14) La Cometa
- 15) Herreros
- 16) Ojo de Agua Santa Clara
- 17) Presidio de Arriba
- 18) San Pedro del Gallo
- 19) Zapa
- 20) Durango
- 21) Santiago Papasquero

GUANAJUATO

- 1) Agua Caliente
- 2) Proguita
- 3) San Bartolo-Moraltos-
Marroquín-Lucio
- 4) Taboad--Atotonilco--
Cieneguilla
- 5) Aguas Buenas - Agua Blanca
- 6) Comanilla
- 7) La Caldera
- 8) San Gregorio
- 9) Cerrito del Agua Caliente-
La Playa
- 10) Atotonilquillo
- 11) Agua Caliente
- 12) La Murada
- 13) Lodos de Munguía
- 14) Los Organos
- 15) Los Tanques - Salados
- 16) Urtico - Ojo de Agua - San José
San Juan
- 17) León
- 18) San Miguel Actopan
- 19) Victoria

COAHUILA

- 1) Agua Verde
- 2) Bulbo
- 3) Hermandad
- 4) La Azufrom
- 5) La Noria
- 6) Ojo Caliente
- 7) Ojo Caliente (Río Bravo)
- 8) San Lucas
- 9) Santa Gertrudía

- 10) Villa Acuña

COLIMA

- 1) Agua Caliente
- 2) El Coloma

CHIAPAS

- 1) El Chichonal
- 2) Río Salado
- 3) Sewecapa
- 4) Escuintla
- 5) Tapachula
- 6) Volcán del Tacaná
- 7) Santa Ana

CHIHUAHUA

- 1) Agua Caliente
- 2) Agua Caliente La Junta
- 3) Babasort
- 4) Baños Salud
- 5) Ojo Caliente
- 6) Premán
- 7) San Buenaventura
- 8) Aldama
- 9) Casas Grandes
- 10) Chihuahua
- 11) Rancho Castilianos

DISTRITO FEDERAL

- 1) Agua Caliente
- 2) Eba
- 3) Las Termas
- 4) Olímpico
- 5) Peñón de los Baños
- 6) Poñito de Guadalupe

HIDALGO

- 1) Atamajac - Atotonilco
El Grande
- 2) Tonatico
- 3) Tlaxdelesh
- 4) El Tepe
- 5) Dios Padre
- 6) Tesontepac
- 7) Alarcuba
- 8) Vito
- 9) Tula
- 10) Tashho
- 11) Pihuelto

TABLA- IV. 2

- 17) Patbé
- 18) Zacuátipan
- 19) Mina Parcután
- 19) Homedades

GUERRERO

- 1) Aculeque
- 2) El Manantial
- 3) El Tabasco
- 4) Churumuco
- 5) Ixcateopan
- 6) Milmaltepec
- 7) Orichitepec
- 8) San Mateo
- 9) Zedáhuero

JALISCO

- 1) Atoyac - Camala
- 2) San Marcos Evangelista - El Fontoso
- 3) Los Frijoles
- 4) Acapulco
- 5) Villa Corona
- 6) Atotonilco El Bajo
- 7) Escápae
- 8) San Ignacio Masaltepec
- 9) Chapala Sur.
- 10) Jocotipac
- 11) Chapala Norte
- 12) Focotitlán - Zapotitlán del Rey
- 13) Agua Caliente - Sta. Rita El Fraile
- 14) Primavera
- 15) La Soledad
- 16) Colimula
- 17) Hervores de la Vera
- 18) Río Agua Caliente

MEXICO, ESTADO DE

- 1) San Pedro de los Baños
- 2) Intero de la Sal
- 3) Intero de Oro
- 4) Donato Guerra
- 5) Istihuaque
- 6) Atotonilco
- 7) Tenango del Valle
- 8) Toxih

MICHOACAN

- 1) Las Arenas - San Sebastián El Salitre
- 2) San Aguán del Maíz Copumitaro - Niapo
- 3) San Juan Tarasameo El Paliemo
- 4) San Agustín del Pulque
- 5) Huicacán - La Encana
- 6) Zona Grotferrin Los Atufres - Matamor - Laguna Los Atufres - San Alejo-Baños Ser Pedro-Barranca Agua Fria-Curutararo-Foto
- 7) Hiedondo-Triamanes-Pantecillas-Ajototes-El Chino Ito-El Chino Zo. El Chino San-José-El Diablo Azaro-Atalimba-Tenisco-Edacán Queréndaro-Coro-Bellino-Dota-Inguera-La Mira-Sacapendo-La Herradura-Indaparape - Strendel Queréndaro
- 8) San Lorenzo - La Rom
- 9) San José Fuerte
- 10) Purisánduro-Jericho-Baño el Salitre
- 11) Ixcac Amiga
- 12) Tumiáhuero
- 13) Baño Caliente-Sipincuezo
- 14) Coahuila
- 15) Los Negritos Palacuareh
- 16) Intán de los Hervores - El Salitre
- 17) La Huacana

- 18) La Piedad
- 19) La Luz
- 20) Juchitán
- 21) Yarráhuero
- 22) Cahuaru-Hustamo
- 23) Buzmevina-Tepetemo

MORELOS

- 1) Atotonilco
- 2) Chicocuat
- 3) Fandición
- 4) Xochitlapec
- 5) Santa Ana Cuauhchihimán
- 6) Tehuacán
- 7) Tlaxitapan

NAYARIT

- 1) Agua Caliente Las Villas
- 2) Altamira
- 3) Amalán de las Cañas San Simón
- 4) La Escobilla
- 5) Bellavista - Aguamayo
- 6) Rosa Morada
- 7) Tatlilán - Santa Isabel
- 8) Las Guaymas
- 9) Jalisco
- 10) Laguna Santa Mica
- 11) Intán del Río - Terreno
- 12) Santa Fe
- 13) Mazatlán
- 14) Río Santiago
- 15) Caramota
- 16) Valle de Banderas
- 17) La Grasa - Oiza
- 18) Varadero
- 19) Los Hervores
- 20) Ixcatlán
- 21) Ruia

NUEVO LEON

- 1) La Boca
- 2) Las Huertas
- 3) Potrero Prieto
- 4) Topo Chico
- 5) Las Hierbas

OAXACA

- 1) Agua Caliente
- 2) Jurihán
- 3) Paraje Yatón-Jeo
- 4) Santa María Sola
- 5) Teotepic
- 6) Zimatlán

PUEBLA

- 1) Chignahuapan
- 2) Los Humeros
- 3) Istiaccala
- 4) Agua Azul
- 5) Baños de Atotonilco
- 6) Baños Colucan
- 7) Rancho Colorado
- 8) Zacatlán

QUERETARO

- 1) Abasco
- 2) Epocote
- 3) Colón
- 4) Tequisquiapan
- 5) Rancho Agua Caliente
- 6) Galindo
- 7) Amacala
- 8) Baños de la Cañada
- 9) Juncuilla
- 10) San Bartolo
- 11) Yachero
- 12) Conca
- 13) La Purísima
- 14) Aratitlán
- 15) Tancana

SAN LUIS POTOSI

- 1) Potosi
- 2) El Gogorrón
- 3) Ojo Caliente
- 4) Lourdes
- 5) Tamulá
- 6) Don Diego
- 7) El Baño
- 8) Lourdes
- 9) Mina Sta. María de la Paz

SINALOA

- 1) Concordia
- 2) El Fuerte
- 3) Sinaloa
- 4) Agua Caliente de Yurcas
- 5) Huerta de los Ríos
- 6) Imala
- 7) La Cifra
- 8) Matías
- 9) Corralito
- 10) Palmarito
- 11) Potrerillo
- 12) Potrerillos
- 13) Ajata
- 14) Burehinto
- 15) Corralito
- 16) Matías

SONORA

- 1) Guaymas
- 2) Acapulco
- 3) Hermosillo
- 4) Ciudad Obregón
- 5) El Turbio
- 6) Cueva Santa
- 7) Puerta Peñasco
- 8) Alamos
- 9) Divisadero
- 10) Guaymas
- 11) Intero
- 12) Huatabampo
- 13) Moctezuma
- 14) Naceari de García
- 15) Naceari Chico
- 16) Sahuaripa

TABASCO

- 1) Tlacotalpa
- 2) Cárdenas

TAMAULIPAS

- 1) Agua Caliente
- 2) La Arroya
- 3) Antiguo Morelos
- 4) Soledad

TLAXCALA

- 1) Tototlán

VERACRUZ

- 1) Tinalillas
- 2) Estación el Central
- 3) Catenaco
- 4) El Palmar
- 5) Zontecomapan

ZACATECAS

- 1) Atotonilco
- 2) Apocol
- 3) Ojo Caliente
- 4) San Alto
- 5) San Martín
- 6) Santa Cruz
- 7) Tepicmearco

ISLAS MARIAS

- 1) Ojo Caliente

Tabla IV.3

Capacidad mínima de Generación durante 30 años en Campos de mayor estudio

L U G A R	POTENCIAL COMPROBADO			POTENCIAL INFERIDO POR GEOFISICA			POTENCIAL INFERIDO POR GEOTERMOMETRO		
	AREA	ESPESOR	CAPACIDAD	AREA	ESPESOR	CAPACIDAD	AREA	ESPESOR	CAPACIDAD
Cerro Prieto, B.C.	19km ²	900m	195MW*	70km ²	900m	540 Mw	38.5km ²	1500 m	1206 Mw
Tulichék, B.C.				21km ²	900m	15 Mw	7km ²	1500 m	147 Mw
Los Azufres, Mich.				20km ²	1000m	170 Mw	35.7km ²	1500 m	606 Mw
Ixtlán de los Hervores, Mich.				10km ²	200m	17 Mw			
Los Negritos: Mich.				40km ²	200m	68 Mw			

* Incluyen 30 Mw de una unidad de baja presión que utilizará la energía almacenada en el agua separada de los pozos que alimentan a las unidades 1, 2, 3 y 4 de 37.5 Mw c/u.

FOCOS TERMALES EN LA REPUBLICA MEXICANA



cado. Aún así, se considera el potencial determinado con las restricciones anotadas antes como el valor mínimo y no como el límite del campo.

Las diferentes evaluaciones que se han ejecutado en los campos de mayor importancia del país son:

4.2.1. Potencial mínimo comprobado.

Actualmente, de nuestros campos geotérmicos solo Cierro Prieto B.C.N. ha aportado datos para realizar este tipo de evaluación. Tomando en cuenta el área comprobada del yacimiento geotérmico, el espesor de estratos productores, las características del campo y los datos de operación de la planta en operación con 150 MW de capacidad instalada hasta ahora, se tiene:

Area del yacimiento	19.2 km ²
Espesor del yacimiento	900 m
Volumen del yacimiento	1.71x10 ¹⁰ m ³ de agua y roca.
Volumen de extracción de agua considerando el 9% del yac.	1.54x10 ⁹ m ³ de agua hidrotérmica.

Densidad del agua a la temperatura del yacimiento	0.9 ton/m ³
Masa del agua hidrotermal extraíble	1.386x10 ⁹ tons.
Consumo de la planta geotermoeléctrica	280 tons/año por KW instalado.

$$\text{Potencial del campo (en KW-año)} = \frac{\text{Masa de agua extraíble}}{\text{Consumo por KW-año}} = \frac{1.38 \times 10^9}{280} = 4.95 \times 10^6$$

Para una explotación en 30 años se tendrá:

$$\text{Capacidad instalada} = \frac{4.95 \times 10^6}{30} = 165 \text{ MW}$$

Considerando la capacidad instalada hasta ahora de 150 MW, -
tendremos:

$$\text{Período de explotación (150 MW)} = \frac{4.95 \times 10^6}{150 \times 10^5} = 33 \text{ años}$$

A este potencial mínimo comprobado se le deban añadir 30 MW que se producirían en una unidad de baja presión que tiene la función de aprovechar la energía almacenada en el agua separada de los pozos que alimentan a las cuatro unidades de 37.5 MW cada una, después de - que estas han realizado su parte y desechado ese líquido con un alto contenido energético.

La tabla No. IV.3 muestra la capacidad que se puede generar - durante un período de treinta años en base a los potenciales anteriores.

4.2.2. Potencial inferido por geoquímica.

En este tipo de evaluación se emplean geotermómetros de sílice (SiO_2) y de Sodio-Potasio-Calcio (Na-K-Ca) para determinar la temperatura a profundidad en zonas geotérmicas, y se considera el área del yacimiento como la limitada por las manifestaciones hidrotermales con un modelo de evaluación conocido. (8)

En nuestro país se adaptó esta evaluación (9) para determinar - preliminarmente el potencial geotérmico nacional, obteniéndose un resultado de 13,000 MW algo así como la capacidad total instalada actualmente para generación eléctrica. Esto se puede observar en las Tablas

IV.4 y IV 4A que presentan un resumen de los campos más estudiados hasta estos momentos.

4.2.3. Potencial inferido por geofísica.

En este caso se considera el volumen del yacimiento geotérmico como el determinado por el área y el espesor de las anomalías -- geotermocelétricas; estimando que se extrae un volumen de fluido -- geotérmico igual al 9% del volumen del yacimiento. También se tomó en cuenta la cantidad de fluido geotérmico que se consume por KW instalado en Cerro Prieto B.C.N.

Los cálculos son similares a los que se realizan en el caso -- del potencial mínimo comprobado; los valores obtenidos en los campos donde se han realizado este tipo de estudios se resumen en la tabla IV.3.

Tabla IV.4

Evaluación Preliminar de Reservorios con base en Geotermómetros

LOCALIZACION		TEMPERATURA ° C				RESERVORIOS SUPUESTO				CAPACIDAD		
LAT. N	LONG. W	Superficial	Geotermo química	Sub-suelo	Area Km ²	Espesor Km	Volu men Km ³	Conte. Calor. 10 ¹⁸ cal.	MW ₅	MW ₃₀		
		(1)	SiO ₂ (2)	NaKCa (2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	
Baja California												
Cerro Prieto A*	32°25'	115°16'	100	225	278	278	38.5	1.5	57.7	9.1	362	1,206
Cerro Prieto B**	32°25'	115°15'				343	50	2	100	19.7	784	2,610
Tulicheck	32°30'	115°29'	100	135	283	283	7	1.5	10.5	1.7	44	147
											828	2,757
Jalisco												
La Primavera	20°40'	103°35'	69	170	173	173	7.5	1.5	11.20	1.06	28	93
La Soledad	20°52'	103°25'	100	153	201	201	4.6	1.5	7.0	0.73	25	86
San Marcos	20°18'	103°30'	96	183	211	211	11.2	1.5	16.8	1.98	65	218
Acatlán	20°25'	103°35'	36	127	166	166	10.5	1.5	15.7	1.42	37	125
Los pozos	20°24'	103°35'	34	112	170	170	9.0	1.5	13.5	1.26	33	111
Hervores de la Vega	20°36'	103°55'	98	154	186	186	2.0	1.5	3.0	0.30	7	26
Agua Caliente	20°32'	103°48'	40	131	191	191	2.5	1.5	3.7	0.39	10	34
Villa Corona	20°24'	103°40'	40	133	203	203	10.3	1.5	15.4	0.17	5	18
San Isidro Mazatpec	20°32'	103°38'	35	143	171	171	4.8	1.5	7.2	0.67	17	59
Mazatpec	20°34'	103°34'	68	157	159	159	1.5	1.5	2.2	0.19	5	16
Cosalá	20°17'	103°18'	94	149	194	194	2.6	1.5	3.9	0.42	11	37
Jocotepec	20°16'	103°26'	50	144	196	196	3.8	1.5	5.6	0.61	16	53
Colimilla	20°40'	103°15'	48	130	174	174	2.0	1.5	3.0	0.29	7	25
Cacaluta	20°04'	103°30'	33	108	212	212	17.6	1.5	26.4	3.12	103	344
Los Camachos	20°46'	103°25'	32	131	214	214	1.5	1.5	2.2	0.28	8	28
											377	1,273

(1) Max. Temp. encontrada superficialmente. Manantial, fumarola.

(2) Temp. Calculada con base en geotermómetros químicos.

(3) Temp. probable con base en los datos existentes.

(4) Area estimada de alteración: 1.5 km² en manifestaciones aisladas.

(5) Techo supuesto a 1.5 km. de prof. (si no hay datos). Fondo supuesto a 3 km. para sistema de convección.

(6) Calculado del área y espesor supuestos.

(7) Calculado como prod. del vol. supuesto, calor específico volumétrico de 0.6 Cal/Cm³ °C y temp. en °C arriba de 15°C (contenido calorífico: Cifras de la columna 7 x 10¹⁸).

(8) MW/Elec. siglo.

(9) MW Elec. a 30 años.

* Cerro Prieto A.-Evaluación tomando como base las manifestaciones superficiales con área de 38.5km² y espesor de 1.5 Km.** Cerro Prieto B.- Evaluación tomando como datos conocidos de los pozos; características máximas (pozo M-53) temp. de 343°C área de 50 Km² y espesor de 2 Km.

Tabla . IV. 4 A

Evaluación Preliminar del Reservorio Geotérmico de los Azufres, Mich.

(Se tomó como base el método empleado en "Assesment of Geothermal - - - Resources of the United States" - 1975, para evaluar Los Geysers y otros campos con predominio de vapor)

Nombre	Localización		Superficial	Geotermoquí mica		Sub-Suelo	Area Km ²	Espesor	Volumen	Cont. calor	MW _g	MW _e	30A
	Lat.	Long.		SiO ₂	NaKCa								
	N	NW	(1)	(2)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	
Los Azufres, Mich.	19°47'	100°37'	115	No aplicable	~240		35.7	1.5	53	7.22	182	606	

- (1) Max. Temp. encontrada superficialmente. Manantial o escape de vapor
- (2) Temp. calculada con base en geotermómetros químicos.
- (3) Temp. probable con base en los datos existentes.
- (4) Area estimada de alteración: 1.5 km² en manifestaciones aisladas
- (5) Techo supuesto a 1.5 km de prof. Fondo supuesto a 3 km para sistemas de convección
- (6) Calculado del área y espesor supuestos
- (7) Calculado como producto del volumen supuesto, calor específico volumétrico de 0.6 Cal/cm³ °C y Temp. en °C arriba de 15°C (Contenido calorífico: Cifras de la columna 7 x 10¹⁸ calorías)
- (8) MW/Elec. Siglo
- (9) MW/Elec. a 30 años.

CAPITULO V
EXPLOTACION

5.0 Introducción.

El aspecto más importante de la energía geotérmica es su explotación, pues es aquí donde se hace tangible la importancia energética fundamentalmente y no energética del recurso y donde se comprueban las predicciones que la exploración aportó al estudiar un campo determinado. En México como ya se mencionó los estudios realizados han fructificado en una planta geotermoeléctrica de 150 MW en Cerro Prieto, Mexicali, B.C.N., campo en el cual se tienen perforados más de 50 pozos y programados otros más, los cuales según planes pretenden utilizarse en varias unidades con el propósito de alcanzar 620 MW en 1984 en ese campo y 24 MW más en Los Azufres Michoacán.

Desde luego que el hablar de explotación geotérmica implica muchas fases anteriores a la producción de fluidos geotérmicos empleados de acuerdo con el tipo de fluido en diversos sistemas de conversión a energía eléctrica y en diferentes procesos para su uso no eléctrico, como son: extracción de sales, secado, calefacción -- etc. Estas etapas mediante las cuales el fluido geotérmico se produce son en orden de ejecución las siguientes: a) exploración (la que ya se mencionó); b) perforación, desarrollo y producción de pozos; c) Transporte de fluidos; y d) Sistemas de conversión y procesos de uso no convencional. Son precisamente los tres puntos finales más implicados en la explotación del recurso y los que se tra-

tarán en éste capítulo y el siguiente.

5.1. Perforación, desarrollo y producción de pozos.

Aunque en términos generales el procedimiento de perforación - geotérmica es muy semejante a la perforación de pozos para extracción de petróleo, presenta sin embargo, algunas diferencias básicas, como por ejemplo la alta temperatura a que están sujetos los lodos de perforación y cemento, lo que provoca tomar en cuenta dilataciones de tuberías de producción, ademe y anclaje de los pozos (fig.V.1) y además hace necesario contemplar los aspectos siguientes:

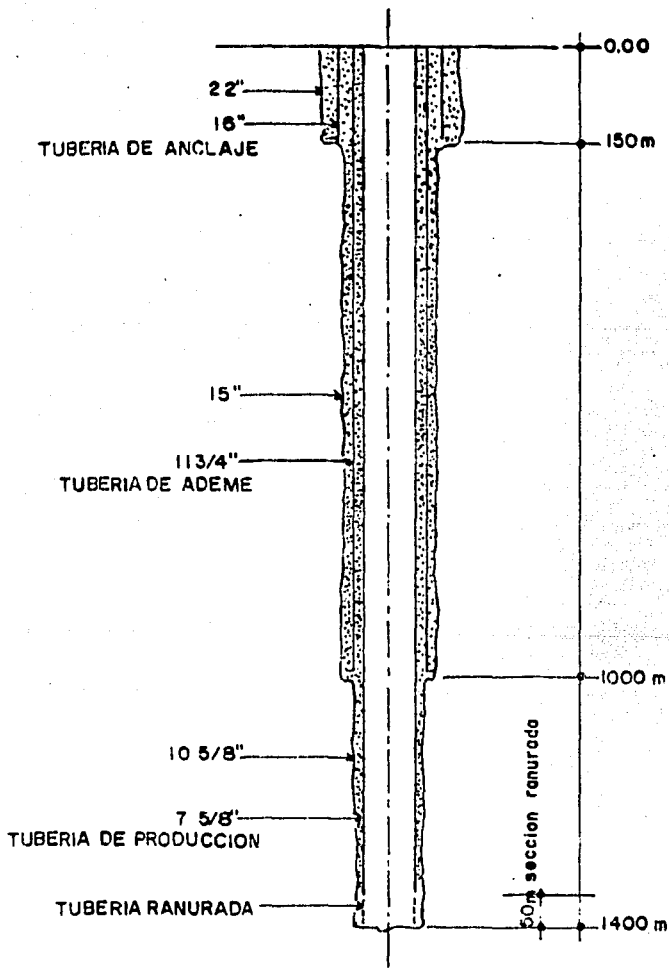
- a) Necesidad de enfriar y reacondicionar lodos de perforación.
- b) Construir las tuberías de producción de mayor diámetro con aceros especiales y con uniones roscadas de mayor resistencia de manera que absorban esfuerzos tensionales, torsionales y radiales producto de la dilatación.
- c) Cementos con aditivos especiales.

Desde luego que los múltiples problemas a que esta expuesta la etapa de perforación geotérmica hacen necesaria la elaboración de un programa de actividades y operaciones que conduzcan hacia perspectivas positivas al construir los pozos. Es precisamente lo que a continuación se pretende indicar en forma general y más que nada descriptiva, lo cual nos permitirá comprender mejor el proceso de explotación de un campo geotérmico.

5.1.1. Perforación

Dentro de esta etapa debe elaborarse un programa que contem-

FIG.V.I



TERMINACION DE UN POZO GEOTERMICO

ple todas las opciones a detalle efectuadas durante la construcción de un pozo, así como los materiales que se usan en él. Como se anota enseguida:

a) Nombre y localización del pozo (indicar coordenadas)

b) Objetivos que persiguen:

Anotar la localización de posibles zonas permeables, probable presencia de algún contacto estratigráfico, conformación de alguna zona poco resistiva, presencia de temperatura de producción de vapor, características geoquímicas de fluidos encontrados.

c) Perforación:

Se señala el tipo de barrenas y diámetros, características de lodos y técnicas de perforación (peso sobre la barrena, revoluciones por minuto en la rotatoria y presión de bombeo), profundidad de diámetros (fig. V.2), tamaño y características de tuberías de ademe y accesorios de cementación, tipo y dosificación del cemento y aditivos, fraguado, fluidos de perforación (lodos) etc.

d) Muestreo:

Aquí se indica la frecuencia y periodicidad de muestreo así como cantidad, longitud y profundidad de muestreo (núcleos) lodos y agua de perforación para análisis geoquímicos.

e) Registros:

Se mencionan todos los registros que se pretenden tomar así como intervalos de perforación donde se realizan.

f) Instalaciones superficiales:

Cantidad y características de equipo de control (preventores) -

conexiones de producción (árbol de válvulas) instalados en la ca
beza del pozo (fig. V.2.)

g) Pruebas:

Pruebas rutinarias o especiales dentro del pozo: duración de las
mismas, peso y presión.

h) Diversos:

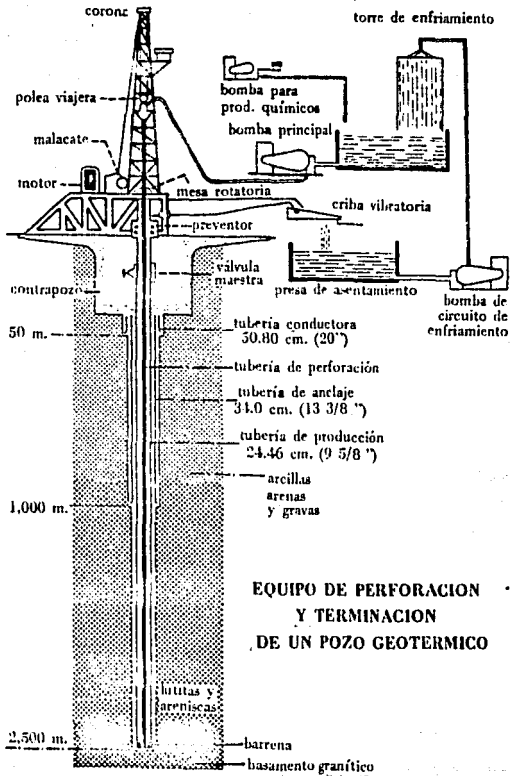
Deben aparecer en el programa de perforación aspectos especiales
de regulación y control que se pretendan ejecutar de acuerdo con
las condiciones locales en el sitio de perforación.

5.1.2. Desarrollo y Producción.

Debido a la experiencia acumulada al abrir los primeros pozos
productores o de exploración después de la terminación de la cons--
trucción de los mismos, ha nacido una nueva metodología para su aper--
tura, pues originalmente se abrían súbitamente lo que causaba pro--
blemas de ruptura por esfuerzos instantáneos producto de la dilata--
ción térmica. Así se inició el método que actualmente se aplica y
que consta de las siguientes etapas: (Esto es vital para una buena
explotación del pozo).

- 1) Etapa de Observación
- 2) Etapa de Inducción
- 3) Período de Calentamiento
- 4) Período de Desarrollo
- 5) Etapa de Evaluación de la Capacidad
Energética del Pozo.

FIG.V.2



Los cuales se describen enseguida:

1) Etapa de Observación.

Una vez terminado y lavado el pozo, se conectan a su válvula maestra (fig. V.2) manómetros y registros, los cuales nos permiten reunir información tal como crecimiento de las tuberías de adame que resultan del efecto térmico, mejor colocación del liner ranurado para mayor producción, nivel del espejo de agua, cuerpos arenosos que aportan más energía térmica, etc; los cuales nos permiten evaluar el pozo - - (fig. V.3. curvas A, B, C y D).

2) Etapa de Inducción.

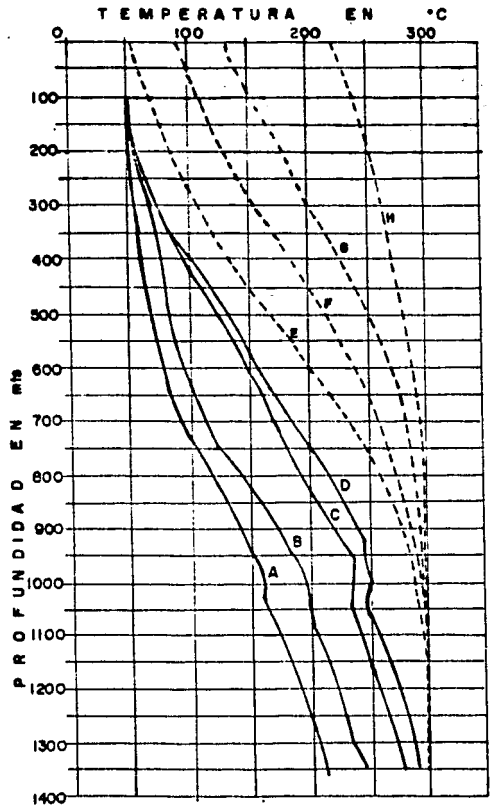
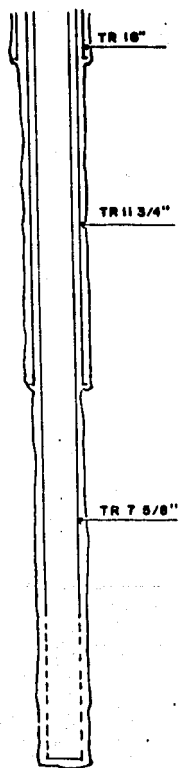
Cuando el nivel del espejo de agua no rebasa el nivel natural del terreno en un período de tiempo de 30 días se requerirá de algún medio para estimular el flujo. Tales medios constituyen los métodos de inducción los cuales son: a) Pistoneo y cubsteo; b) Inyección de vapor; c) Bombeo y d) Inyección de aire.

3) Período de Calentamiento.

Este consiste en elevar la presión y temperatura tanto en la cabeza del pozo como a lo largo del mismo, bajo total control y gusto del operador. Este incremento se lleva hasta lograr la presión que probablemente se obtenga al descargar por un cono (fig. V.4.).

El período de calentamiento se inicia con el flujo espontáneo de agua del pozo a través de una purga provista de una válvula de regulación que permite limitar el gasto. Esta operación se hace lentamente (fig. V.3 curvas E, F, G, y H). La idea básica es dar oportu

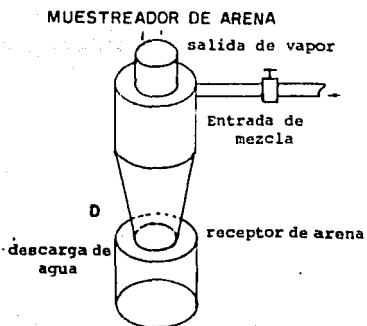
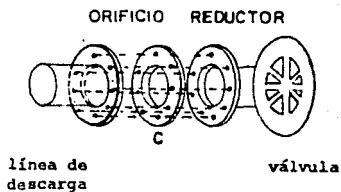
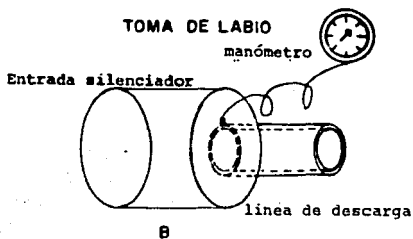
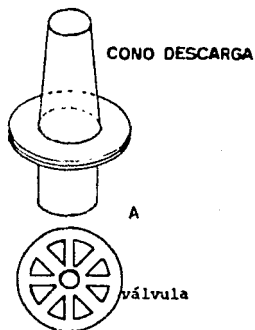
.67.



A-4hr	B-14hr	C-204 hr	D-188 dias
E-2 dias	F-5 dias	G-8 dias	H-15 dias

FIGV.3.

FIG.V.4



nidad para que el calentamiento se prolongue a la tubería intermedia, a la superficial, al conductor cuando este existe y si es posible calentar las formaciones que circundan el pozo. Su duración -- según experiencias es de 20 - 30 días y más.

4) Período de desarrollo y etapa de evaluación.

En esta etapa, el pozo se descarga por un diámetro restringido, el cual se va incrementando hasta llegar al diámetro total de producción. El objetivo es que arroje todos los materiales y substancias que se emplearon en la perforación, recortes asentados en el fondo, la arena del yacimiento, evitando así que al conectarlo al separador y sistema colector de vapor, pudiera dañar las instalaciones superficiales y turbinas de la planta (fig. V. 5).

Como es común obtener pequeños fragmentos de arena, se dan un -- tiempo suficiente para que tales partículas se estabilicen. Tal operación requiere de 3 a 7 días. Posteriormente se determina el flujo.

Habiendo terminado el desarrollo se obtienen una serie de registros de temperatura y presión, variando los flujos de descarga efectuando al final un registro de calibración en la tubería de producción. De esta forma se hace la evaluación inicial de cada pozo, la que se confrontará oportunamente al operar el separador definitivo.⁽¹⁰⁾

5.1.3 Transporte de Fluidos.

El objetivo que se persigue en este punto es presentar en forma descriptiva los elementos funcionales del sistema de transporte

INSTALACIONES SUPERFICIAES PARA CALENTAMIENTO DESARROLLO Y MEDICION DE UN POZO

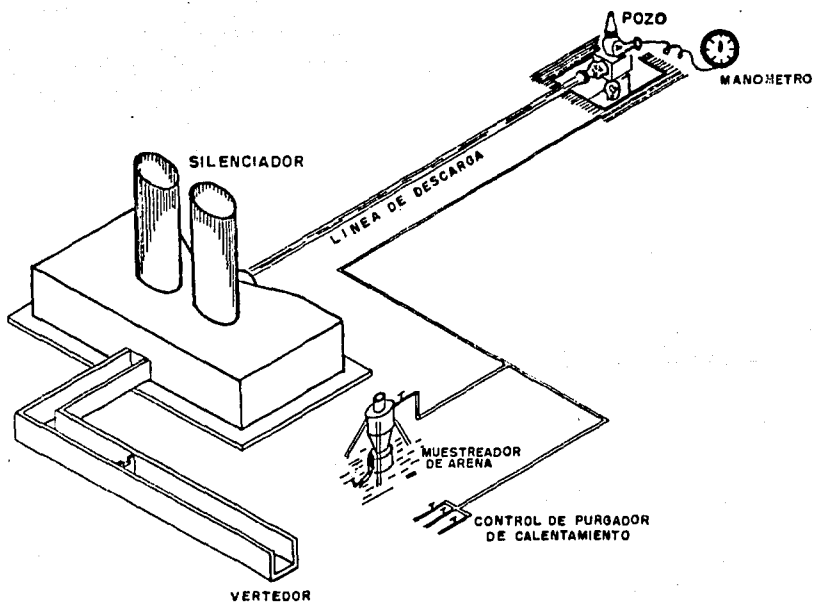


FIG.V.5

de fluidos el cual va desde los pozos productores hasta la entrada a la casa de máquinas y de su salida de ésta, a los pozos de inyección o lagunas de evaporación. La descripción cualitativa entre los componentes de transporte así como aquellos parámetros y relaciones que afectan en mayor grado el comportamiento económico y técnico del sistema de transporte de fluidos.

5.1.3.2 Descarga de pozos.

La descarga de pozos puede ser en forma de vapor ó líquido solos, ó bien como mezcla vapor-líquido, y se puede presentar de dos maneras, como flujo instantáneo, o bien que sean bombeados estos fluidos.

5.1.3.3. Separación de fases.

En pozos de flujo espontáneo con líquido dominante, el flash se inicia en el agujero del pozo (o en la formación geológica) y se completa en la superficie, en el separador producto de la expansión en la cual disminuye la presión y se separan la fase líquida y vapor.

El porcentaje de vapor (en base masa) que se produce esta en función directa del contenido calórico del líquido saturado 100% en la boca del pozo y por los niveles de presión seleccionados en el flash-separador. Para obtener un proceso termodinámico que ofrezca resultados económicamente favorables para generación eléctrica, se requiere de una o más etapas de flasheo (para Cerro Prieto y su 5a. unidad de baja presión se determinó que fuesen dos etapas).

5.1.3.1. Sistema de tubería.

Los parámetros del flujo que se deben conocer para diseñar el sistema de transporte son: presiones estáticas y dinámicas, temperatura, relación vapor-líquido (calidad termodinámica del vapor) identificación de sólidos transportados (si los hay) y constituyentes químicos de las corrientes de flujo. El diseño de tuberías para flujo en dos fases, económicamente competitivos, es más complejo que el diseño para flujo en una fase, sin embargo, dicho sistema utiliza los mismos parámetros técnicos y económicos.

El objetivo del diseño es reducir las pérdidas de presión, calor y minimizar el costo de capital y operación del sistema. Se requiere minimizar la pérdida de calor mediante el aislamiento adecuado de todas las tuberías conductoras, así como del equipo de separación. A menudo los valores que se escogen son diferentes de los valores teóricos, a causa de la estandarización por parte de los fabricantes de las dimensiones de la tubería y del aislamiento. Un levantamiento topográfico de las rutas propuestas para las tuberías es esencial para llevar a cabo el diseño preliminar. El ingeniero encargado del diseño debe considerar el rango más extremo de temperaturas esperando, porque la tubería la cual es anclada en varias secciones debe estar libre para moverse lateralmente y longitudinalmente entre los puntos de anclaje. El que diseña las tuberías debe considerar los posibles asentamientos del terreno. El uso de juntas de expansión de tipo fuelle debe ser usada lo menos que sea

posible a causa de sus altos costos iniciales y los graves problemas de mantenimiento. Por razones económicas, es preferible darle a la geometría del sistema la flexibilidad necesaria para absorber la expansión térmica. La distribución en planta puede estar basada en forma triangular, rectangular u otras.

5.2. Ciclos Térmicos en explotación geotérmica para generación eléctrica.

El fluido geotérmico que es extraído del subsuelo puede encontrarse en forma de líquido (salmuera caliente), de vapor seco, o bien como una mezcla de vapor y agua; así que dependiendo del estado en que se manifieste en la superficie, existen diversos y diferentes ciclos térmicos que usan el ciclo Rankine termodinámico, los cuales en conjunto constituyen las posibles alternativas de aprovechamiento de la energía geotérmica aquí en México para generar energía eléctrica. Estos sistemas son: Sistemas de flashco, (que es el único usado comercialmente hoy día) ciclo binario, sistemas de flujo total y ciclo híbrido fosil-geotérmico (Figs. V.6 y 7).

Hay desde luego otras formas de aprovechamiento geotérmico como son el utilizar todo el pozo en el sistema binario, como un intercambiador de calor y otros más que resultan de la combinación de los anteriores, pero que aún han sido poco estudiados para implantarse en nuestra República.⁽¹¹⁾

Enseguida se presenta una descripción general de cada uno de

.74.
FIG.V.6

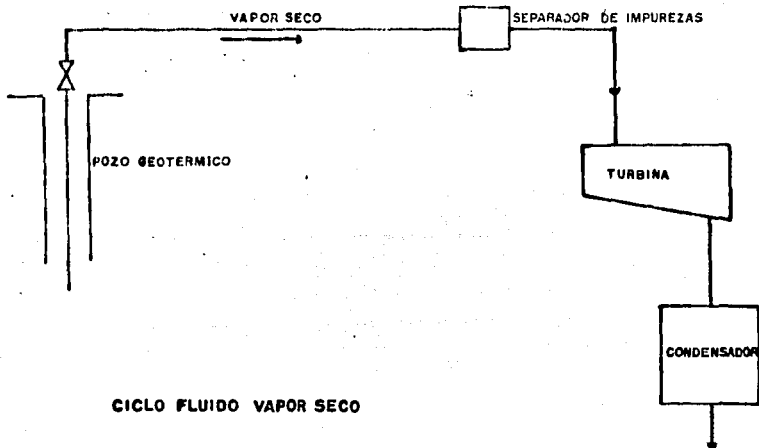
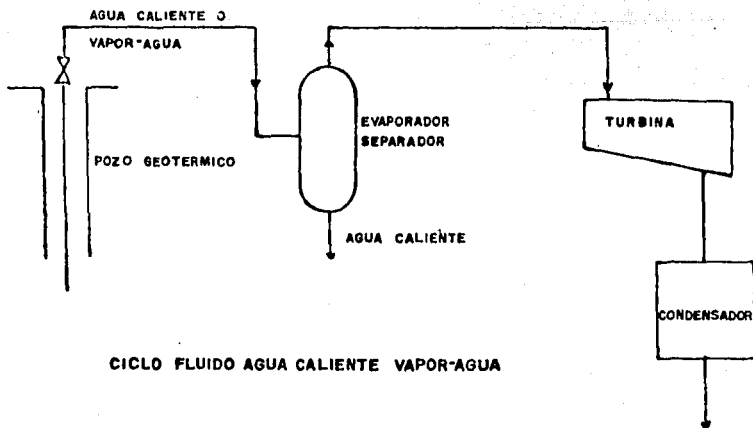


FIG.V.7



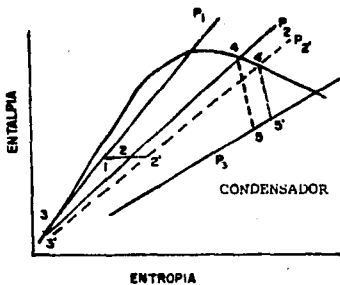
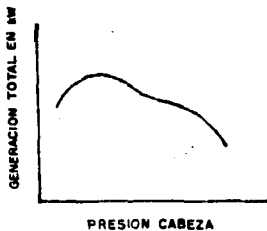
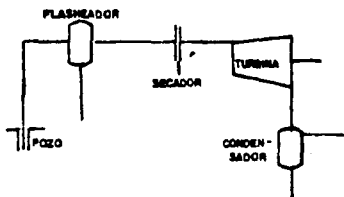
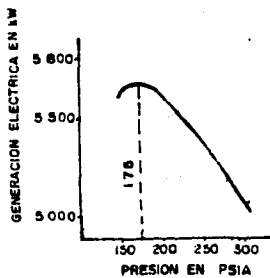
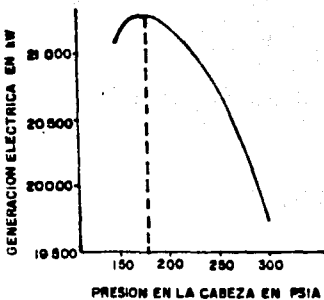
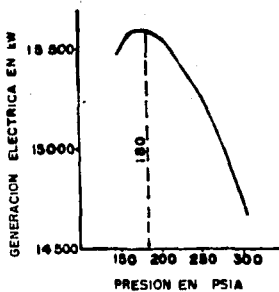
los procesos alternos considerando las condiciones que prevalecen en Cerro Prieto , pero antes es preciso señalar los factores principales involucrados en el diseño de una planta geotermoelectrica, así como sus fundamentos de operación.

Un factor trascendente en el diseño de plantas geotermoelectricas es la composición química del fluido pues en función de ella - estará la incrustación, otros son: flujo, entalpia y presión, factor técnico y ecológico, alternativa de conversión y factibilidad comercial.

El potencial de generación de cada pozo se calcula con su -- curva característica de producción (Fig. V.8, 9, 10 para los pozos M-5 y M-26 en Cerro Prieto). Como se observa para cada pozo existe un potencial máximo de generación a una presión de extracción; idealmente considerando solo factores termodinámicos se recomendaría trabajar los pozos a la presión que corresponde al máximo de - generación, pero como todos ellos tienen este máximo a diferentes presiones por ello sus curvas se suman para obtener una resultante en cuyo máximo se operará una planta donde converjan las producciones de cada pozo (Fig. VI.11) . Así para resolver el problema de la presión de operación es preciso conocer todas las curvas de los pozos que participarán en la generación de energía eléctrica y así obtener la total, para con ella seleccionar la presión de operación que más convenga del turbogenerador.

Es preciso señalar que ésta presión y producción de un pozo va ría a la larga como ya se dijo por efectos de incrustación, por lo

FIGS. 8,9,10,11,12,y13.



cual se selecciona una presión menor a la óptima seleccionada en la turbina, para así asegurar que ésta sea constante durante la vida útil de la planta. Por ejemplo en Cerro Prieto se trabaja a 115 lb/in² abs. para pozos en producción y la turbina a 90 lb/in² si ello se compara con las curvas características se puede notar que se está operando 60 lb/in² abs. abajo de la óptima. Es decir, se sacrifica generación, pero se gana en vida útil de pozo y reservorio.

5.2.1.- Sistema de Flasheo:

El proceso (Fig. V.12) se usa en explotación de recursos de líquido dominante. Este consiste en reducir la presión del fluido geotérmico para evaporar parte de él, cuyo vapor así generado se usa para el líquido (el cual se procesa de nuevo ó se desecha) para posteriormente accionar una turbina convencional.

El procedimiento termodinámico de flasheo se ve en el diagrama de Molliere (Fig. V.13).

Se requiere reducir P_1 a P_2 para lograr producir una cantidad considerable de vapor, si continuamos hasta P'_2 la cantidad se incrementa, pero la expansión permitida en la turbina a una presión del condensador P_3 es disminuída y la diferencia de entalpías se reduce de $(h_4 - h_5)$ a $(h'_4 - h'_5)$. El trabajo realizado por la turbina es el producto del flujo de vapor por la diferencia de entalpía durante la expansión.

$$\text{Trabajo} = m \times \Delta h.$$

Para cada P_2 de flasheo hay una cantidad de vapor producida

así como una Δh y un trabajo desarrollado en la turbina. Dentro de todas estas presiones de flasheo (P_2) hay una óptima ⁽¹²⁾ para que el trabajo en la turbina sea máximo. Tal presión es la recomendada como la presión de operación.

En las diferentes alternativas geotérmicas de generación eléctrica se desarrolló un programa computacional para calcular el balance térmico según las condiciones indicadas, presentándose las soluciones óptimas de operación para cada caso.

Las características comunes de la mezcla se tomaron del promedio que hay en Cerro Prieto.

$$\begin{aligned} P &= 115 \text{ lb/in}^2 & x &= 30\% & T &= 338^\circ\text{F}. \\ h &= 573.4 \text{ BTU/lb} & w &= \text{Flujo} = 1000 \text{ ton/h.} \end{aligned}$$

Así obtenemos los balances para una etapa y dos de flasheo -- (Fig. V.14 y V.15). Donde la de dos etapas supera en 15.6% a la de una, aunque su turbina es más grande y compleja pero ahorra --- torres enfriadoras, bombas, tuberías etc., a si la misma se operara con dos turbinas de presión alta y baja respectivamente.

5.2.2. Sistema de flujo Total.

La idea en este sistema es que toda la mezcla geotérmica -- (vapor y agua) desarrolle trabajo, para esto hay varias alternativas de las cuales aquí solo se trata la que utiliza una turbina del tipo impulsor. En éste sistema el flujo total se pasa a través de -- toberas para transformar la energía térmica en cinética, misma que

FIG.V.14

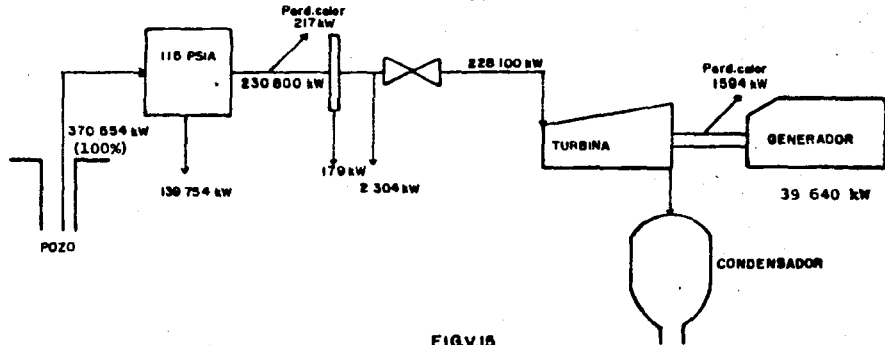
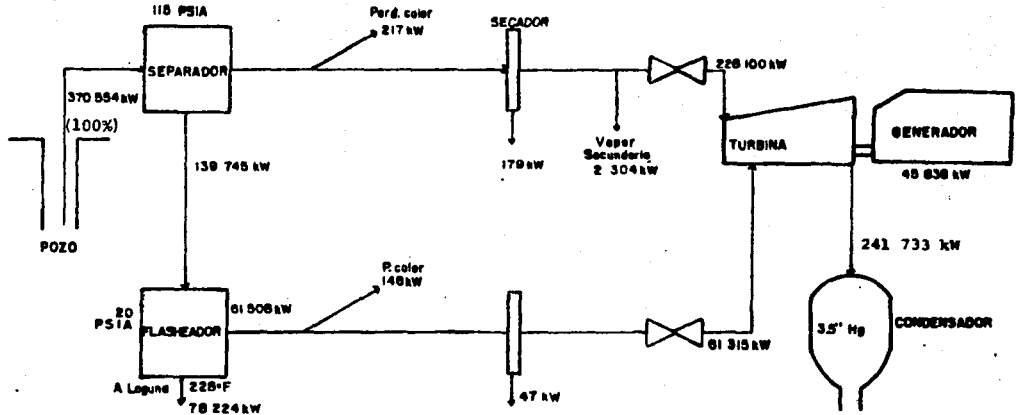


FIG.V.15



acciona el turbogenerador (Fig. V.16)

Enseguida se analiza el sistema por componentes.

a) Tobera (Fig. V. 17).

El proceso es a entalpía constante $h_{t1} = h_{t2}$ como la

$$h_t = h + v^2/2g$$

v = Velocidad

h_t = entalpía total

g = Aceleración gravitacional

h = entalpía estática.

de aquí: $v_2^2 = v_1^2 + 2g (h_1 - h_2)$ que es la velocidad de salida de la tobera, la cual se puede calcular pues la entalpía de salida se conoce así como la velocidad de entrada y presión de salida dado que es igual a la presión de operación de la turbina.

b) Turbina: (Fig. V. 18)

El proceso es a presión constante así como la entalpía estática.

La potencia generada por tal dispositivo la da la ecuación:

$$\text{Pot} = m (h_{t2} - h_{t3})$$

$$\text{además } h_{t3} = h_3 + v_3^2 / 2g$$

$$h_{t2} = h_2 + v_2^2 / 2g$$

$$h_2 = h_3$$

$$\text{Pot} = \frac{m (v_2^2 - v_3^2)}{2g}$$

La potencia máxima obtenida en la flecha es cuando $v_3 = 0$.

Considerando las ineficiencias del proceso la expresión real -
de la potencia es:
$$\text{Pot} = 0.701 \frac{m v_2^2}{2g}$$

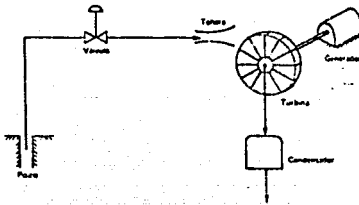


FIG. V.16

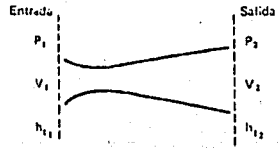


FIG. V.17

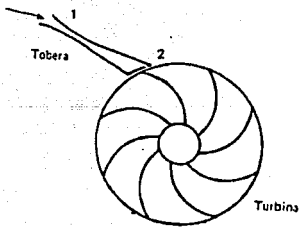


FIG. V.18

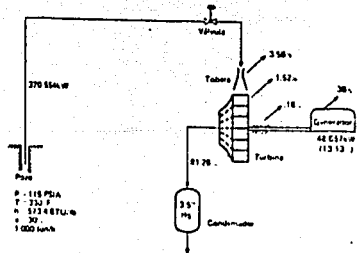


FIG. V.19

En la Fig. V. 19 se muestra el balance de energía para un sistema de flujo total similar al de Cerro Prieto. Considerando ocho pozos de diámetro 7.625' pulgadas y produciendo 1000 ton/h de fluido.

La potencia generada para un flujo geotérmico dado depende de la velocidad de salida en la tobera, la cual es fijada a su vez por la presión de condensación (Fig. V.20). En tal figura se ve la dependencia de la potencia generada a la presión en el condensador. -

Así también aparece la potencia generada como porcentaje de la potencia total disponible en el cabezal del pozo en la Fig. V. 19 -

El sistema de flujo total presenta ventajas como simplicidad de sus piezas (tobera y turbina) y economía en el transporte de -- fluido, y desventajas tales como su operación y materiales de construcción de tobera y turbina para evitar la incrustación. Actualmente se trabaja en este punto de selección de materiales, el cual presenta el obstáculo primordial junto con la poca experimentación.

5.2.3. Sistemas de Flujo Binario:

Su aspecto principal de éste proceso es la transferencia de energía ó calor de el fluido geotérmico al de trabajo por medio de un intercambiador de calor. En tal etapa de transferencia de calor el fluido de trabajo se vaporiza y luego se expande en una turbina convencional, enseguida se condensa, posteriormente se bombea de nuevo para repetir el ciclo Rankine. (Fig. V. 21)

5.2.3.1. Fluido de Trabajo.

Hay un número grande de fluidos que pueden ser usados en

el ciclo binario con diferentes propiedades termodinámicas. Los criterios de selección de fluido de trabajo normalmente sugieren, que un buen fluido de trabajo debe reunir las siguientes características:

a) Temperatura crítica inferior a la del ciclo, b) presión de saturación a temperaturas máximas y mínimas; c) químicamente inerte y estable durante cambios de temperatura en el ciclo; d) barato y fácil de conseguir, e) no tóxico.

Encontrar un fluido con todos estos requisitos es difícil e imposible, por lo que la selección se hace en acuerdo a los objetivos trazados e importancia dada a cada propiedad.

5.2.3.2. Intercambiadores de Calor.

Este equipo dentro del sistema es el principal, dado que - el mantener su superficie limpia proporcionará una operación efectiva y de no ser así la incrustación reduce tal eficiencia. La fig. V.22 muestra el efecto; aquí la incrustación se debe al óxido de silicio. La incrustación provoca reducción de flujo de calor para un ΔT dado y si se quiere un flujo constante ello implicaría aumentar ΔT entre los fluidos, reduciendo así la eficiencia del ciclo, de aquí la importancia de mantener limpia la superficie.

Actualmente con el propósito de eliminar esta situación se está experimentando con fluidos de trabajo que se puedan poner en contacto, con el fluido geotérmico de forma inmisil (transferencia de calor por contacto directo) y así evitar la incrustación y lograr

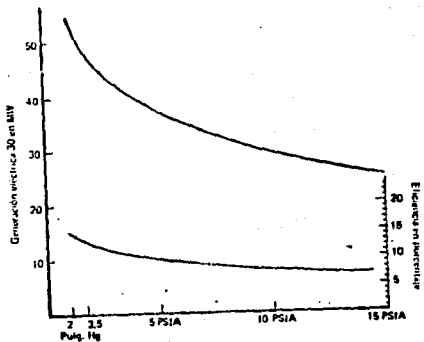


FIG. V.20

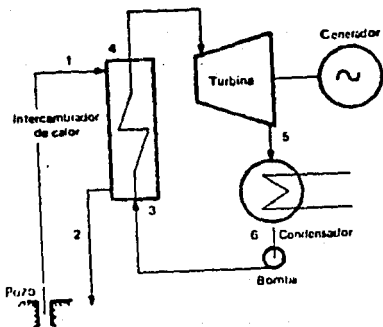


FIG. V.21

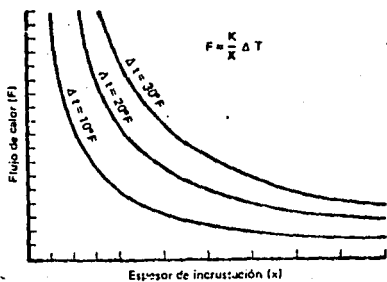


FIG. V.22

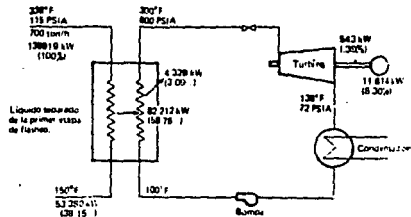


FIG. V.23

una mayor efectividad del intercambiador, pero ello aún está en -- etapa de desarrollo pues pase a su éxito industrial en otras aplicaciones, se debe comprender el arduo trabajo que hay que realizar antes de que sea probado en aplicaciones geotérmicas.

La tecnología actual de diseño y fabricación de intercambiadores de calor, turbinas, bombas así como materiales de trabajo esta avanzada, pero si su aplicación al terreno geotérmico es apropiada, será adecuada para satisfacer las demandas de los ciclos binarios - geotérmicos.

Referente a la aplicación de ciclos binarios hay muchas alternativas pues el fluido geotérmico de pozos de agua caliente puede utilizarse en sus fases líquida o gaseosa separadas, dado que no es práctico usarlos juntos. De ellas se prefiere la líquida por razón del menor tamaño del intercambiador al trabajar con líquido o fluido represionado.

Enseguida se presenta una alternativa de empleo del ciclo binario usando el líquido desechado en la primera etapa de flasheo e isobutano como fluido de trabajo.

Las condiciones de la salmuera son:

$p = 115 \text{ psia}$

$x = 0.0$

$t = 338 \text{ }^\circ\text{F}$

$w = 700 \text{ ton/h}$ (en base al sistema -
de flasheo)

$h = 309.3 \text{ BTU/lb}$

La presión de trabajo en la turbina usando isobutano es 600 --

para la cual corresponde a la generación óptima. En la fig. V.23 se presentan los resultados.

Es interesante notar que empleando el ciclo binario, el aprovechamiento de la energía geotérmica de la salmuera desechada es superior a si se utiliza una evaporación flash doble (8.3% comparado con 5.45%).

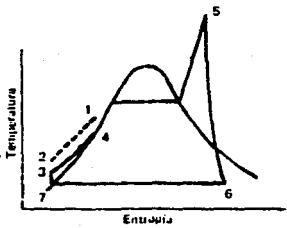
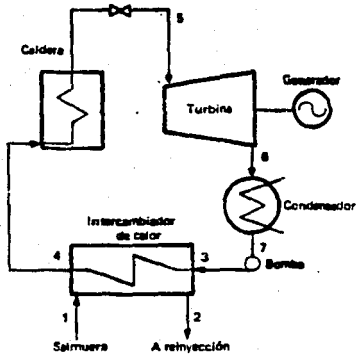
5.2.4. Sistema híbrido fósil-geotérmico.

En los sistemas tratados anteriormente existe el común en todos ellos de que la única fuente de calor es el fluido geotérmico. En este sistema híbrido, además de la energía emana del fluido geotérmico, está la que viene de combustibles fósiles (Fig. V.24). Es decir, el sistema híbrido utiliza dos sistemas de calor, una en la cual se aprovechan las altas temperaturas del proceso de combustión de compuestos fósiles, y otra en la que utiliza las menores temperaturas de la salmuera geotérmica caliente.

Así que el fluido de trabajo recibe una cantidad de calor Q_g de el fluido geotérmico y otra Q_f del combustible fósil, al mismo tiempo que genera una cantidad de trabajo W_h .

Es claro que como el sistema híbrido utiliza las dos fuentes mencionadas de calor su comparación tiene que ser entonces con respecto a las fuentes usadas de forma individual. De acuerdo con esto la planta fósil recibe una cantidad de calor Q_f y produce un trabajo W_f con una eficiencia $N_f = W_f/Q_f$ de igual manera, la planta geotérmica recibe un calor Q_g y desarrolla un trabajo W_g con una eficien-

Fig. V. 24



cia $N_g = W_g / Q_g$. Por su parte el sistema híbrido produce un trabajo W_h con una eficiencia $N_h = W_h / Q_f + Q_g$.

Para establecer la base de comparación se define el factor - de mérito F el cual determina que sistema produce más o menos tra- bajo.

$$F = W_h / W_f + W_g$$

Es obvio que el propósito u objetivo del sistema híbrido es - que tal factor supere la unidad.

Si definimos la fracción de calor geotérmico como:

$$\phi = Q_g / Q_f$$

tenemos que:

$$F = \frac{1 + \phi N_h}{N_f + \phi N_g}$$

Como ejemplo tomemos una planta fósil de 130 MW de capacidad y con un fluido geotérmico similar al de Cerro Prieto, pero repre- sionado para evitar flasheo.

La Fig. V. 25 muestra el balance de calor en tal planta de - combustibles fósiles convencionales, presentando los resultados si- guientes:

$$\begin{aligned} Q_f &= 367116 \text{ KW} & N_f &= 0.3541 \\ W_f &= 130000 \text{ KW} \end{aligned}$$

En la figura V. 26 tenemos el balance de calor para el caso - híbrido con los resultados siguientes:

$$\begin{aligned} Q_f &= 321549 \text{ KW (Cantidad inferior} & Q_g &= 87418 \text{ KW} \\ &\text{a } Q_f \text{ del sistema} & \phi &= Q_g / Q_f = 0.27187 \\ &\text{individual.} & N_f &= 0.31787 \end{aligned}$$

Tomando como eficiencia máxima el flujo total en la planta -

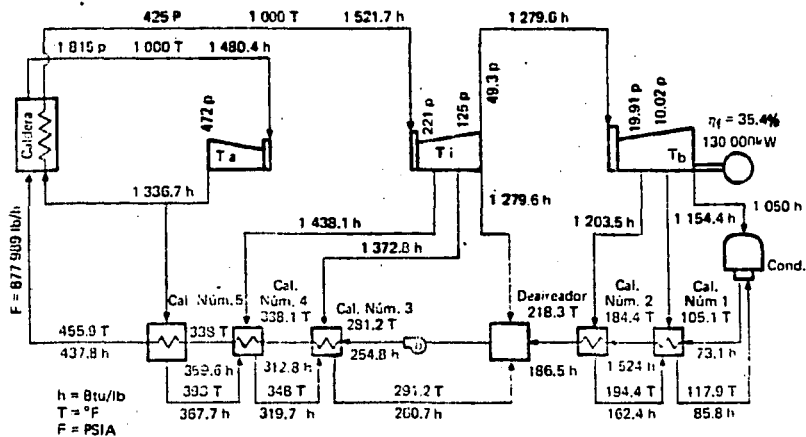


Fig. V. 25

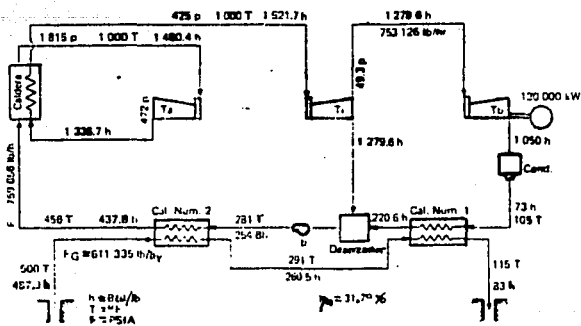


Fig. V. 26

geotérmica tenemos:

$$N_g = 0.1463$$

Eficiencia lograda suponiendo que la tobera es 95% eficiente, la turbina 90% y 96% de eficiencia combinada mecánica y eléctrica.

De aquí:

$$F = 1.02645$$

Esto indica la ventaja de la planta híbrida sobre las individuales. Sin embargo, debemos considerar el hecho de que tal sistema combinado solo se pueda instalar donde haya un campo geotérmico.

Respecto a la tecnología a utilizarse, ésta es la misma que la usada en una planta de tipo convencional con el adicional intercambiador de calor para la transferencia entre la salmuera geotérmica y el fluido de trabajo.

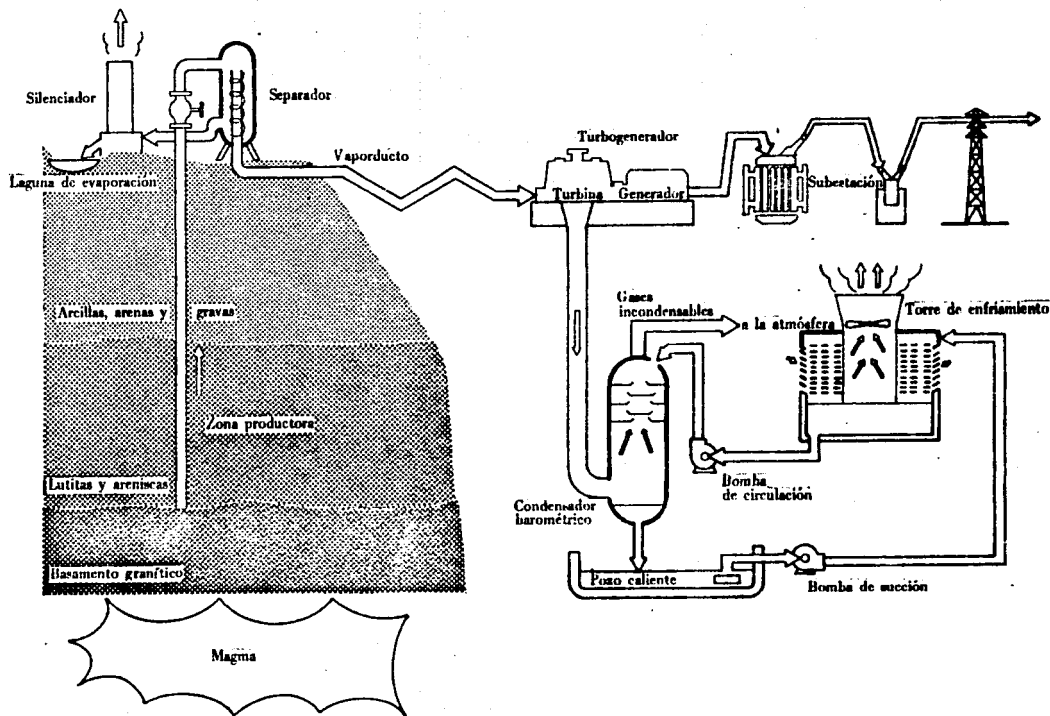
5.3. Planta Geotermoeléctrica de Cerro Prieto.

Es necesario mostrar cuantitativamente la importancia de la explotación geotérmica. Para tal propósito enseguida se presenta una breve descripción de carácter técnico de la denominada planta Geotermoeléctrica Cerro Prieto (Fig. 27) ubicada en la parte norte de la Península de Baja California Norte.

En abril de 1973 la CFE inició la explotación comercial de la planta, contando con una capacidad de generación de 75 MW conformada por dos unidades turbogeneradoras de 37.5 MW cada una.

A partir de esa fecha, la generación anual se ha incrementado gradualmente como lo demuestra el factor de planta anual que en -

FIG.V.27



1973 fué 0.63 y en 1978 de 0.91 (Fig. V.28).

La generación acumulada a abril de 1979 fué 3500×10^6 KWh - (3.5 GWh). Cifra que generada por una termoeléctrica convencional habría requerido 5.5×10^6 barriles de petróleo.

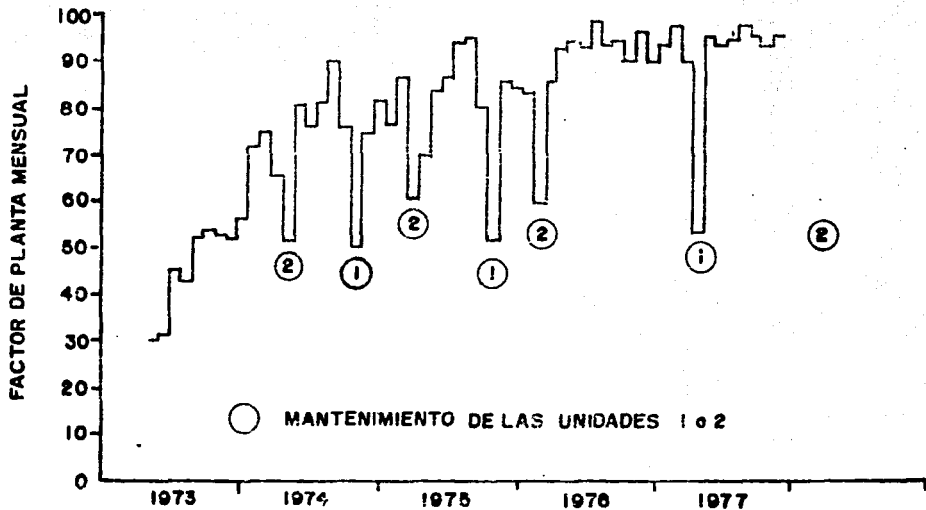
Por otro lado, el diseño de una planta geotermoeléctrica se - semeja a una termoeléctrica convencional con ciertas variantes, a saber:

- a) El generador de vapor (caldera) es substituido por el yacimiento geotérmico y los pozos que producen tal vapor.
- b) El contenido de gases incondensables en el vapor requiere del - uso de condensadores de mezcla (tipo contacto directo) en lugar de los de superficie, usados en plantas convencionales.
- c) El vapor condensado que proviene del pozo geotérmico permite -- prescindir de una fuente externa de agua en disponibilidad para reposición de agua perdida en la torre de enfriamiento.

La construcción de la segunda etapa de la planta Cerro Prieto se inició en 1977 y fué terminada y puesta en operación en abril de 1979 la cual proporciona 150 MW instalados. También en abril del - mismo año se inició la construcción de la 5a. unidad con capacidad de 30 MW, la cual será acondicionada para trabajar con el vapor de baja presión obtenido del agua caliente que se separa del vapor y que actualmente se descarga en la laguna de evaporación.

La energía eléctrica producida en Cerro Prieto se envía al - sistema "Tijuana-Mexicali" a través de una línea de transmisión de

FIG.V.28



FACTOR DE PLANTA MENSUAL UNIDADES 1 y 2 DE CERRO PRIETO

doble circuito de 161 KV de 31 Km que se conecta a la subestación de Cd. Mexicali.

El ahorro de combustible que se obtiene de las cuatro unidades se estima que es aproximadamente de 2×10^6 b/a cifra que representa la producción de petróleo de un día en estos momentos pero que puede crecer en importancia a medida que se exploten otros campos, o se amplie este de Cerro Prieto, por lo cual hará más notorio el ahorro de consumo de petróleo utilizado en este y otros fines.

A continuación se presentan una serie de datos técnicos y proyectos que el Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico tiene. Los datos son precisamente del campo Cerro Prieto. (Tablas V.1.7).

5.3.1 Inversiones.

Las inversiones que se requieran en una planta geotermoeléctrica, dependerá de las características del yacimiento geotérmico que se explota. Actualmente sólo se tienen los costos de la planta --- de Cerro Prieto, que dan una idea de las inversiones necesarias.

Costos de Unidades 1 y 2 de 37.5 MW c/u	\$ 504,750.000.00
Costo por Kw-instalado*	6,730.00
Costo operación planta (1975)	14,289.000.00
Costo operación campo (1975)	<u>15,784.000.00</u>
Costos Totales de Operación (1975)	30,073.000.00
Costos fijos (amortización, depreciación, intereses, etc.)	71,150.000.00
COSTO TOTAL ANUAL	\$ 101,223.000.00

*Incluye los gastos de estudios preliminares, pozos exploratorios-

sistema de desfogue de agua, campamento, líneas de transmisión, etc. que al ampliar la capacidad instalada se prorratearán en el total del kwh instalado, Informaciones de la Gerencia General de Construcción de la CFE y tomando en cuenta el costo de los pozos a perforar se se espera un costo total para las unidades 3 y 4 de \$ 355.451.000 lo que resulta un costo de \$ 4,473.00 por kw instalado de esas unidades y un costo de \$ 5,601.000 por kw instalado en la planta de -- 150 MW.

Generación Neta en 1975-492 x 10⁶ kw-hr

Costo por kw-hr generado, considerando solo los costos de operación,

$$\frac{30,073.000.00}{492,000.000.00} = \$ 0.0611$$

Costo por kwh generado considerando el costo total anual.

$$\frac{101,223.000}{492,000.000} = \$ 0.2057$$

Tabla V.1:

Datos Técnicos de la Planta.

Capacidad total instalada	150 Mw.
Turbogenerador	4
Capacidad por turbogenerador:	37.5 Mw.
Tipo de Turbinas:	Cilindro de doble flujo tipo de impulso y condensación.
Velocidad turbogeneradores:	3600.RPM
Presión entrada (manométrica):	5.3 Kg/cm ²
Temperatura:	160 °C
Consumo específico de vapor:	10 Ton/Mw.

Tabla V.2

UNIDAD/PLANTA	MW	Fecha
3a. U. Cerro Prieto I	37.5	03/79
4a. U. Cerro Prieto I	37.5	05/79
5a. U. Cerro Prieto I	30.0	05/82
1a. U. Cerro Prieto II	55.0	05/82
2a. U. Cerro Prieto II	55.0	05/82
3a. U. Cerro Prieto II	55.0	05/84
4a. U. Cerro Prieto II	55.0	05/84
Capacidad Actual:	150 MW	
Capacidad programada total p/84	620 MW	

Tabla V.3.

Area	No. Pozo	Mw/Pozo	MW	Observaciones
I	30	6	180	Probada
II	30	10	300	Probada
III	20	5	100	Probada
IV	16	6.2	100	Probada
V	20	10	200	Probable
VI	16	7.5	120	Probable
			<u>1,000</u>	

Tabla V.4 Generación Bruta desde 1973

Año	GWh	Factor de Planta
1973	193	0.63
1974	463	0.70
1975	518	0.79
1976	579	0.88
1977	592	0.90
1978	<u>598</u>	0.91
T O T A L	2943	

Tabla V.5. Datos Técnicos del Campo

Número de pozos en operación	30
Longitud total perforada	45734 m
Profundidad de la zona productora:	1500 m
Producción total de mezcla	4040 ton/hr
Producción total de vapor	1500 ton/hr
Producción total de agua separada	3540 ton/hr
Entalpia promedio de la mezcla	313 Kcal/kg
Rango de temperatura del yacimiento	250-350 °C
Reservas probadas	94x10 ⁶ MWh
Reservas probables:	138x10 ⁶ MWh

Tabla V.6. Longitud de los vapor-ductos en mts.

Diámetros	Longitudes	
	U 1 y 2	U 3 y 4
40.48 cm (12")	1456	
40.64 cm (16")	4286	1278
45.72 cm (18")	2429	3329
48.26 cm (20")	136	1228
60.96 cm (24")	560	498

Cont. Tabla V.6 Diámetros	Longitud	
	U 1 y 2	U 3 y 4
66.04 cm (26")	584	970
76.20 cm (30")	1236	1930
81.28 cm (23")	--	1926
86.36 cm (34")	1896	--
	12583	11159

Tabla V.7: Principales Componentes Químicos en el Agua del Yacimiento y en el Agua Separada a Presión Atmosférica (en ppm).

Componentes Químicos		Yacimientos	Agua Separada
Na	Sodio	4711	7641
K	Potasio	1120	1822
Ca	Calcio	270	439
Cl	Cloruros	8670	14031
SiO ₂	Sílice	673	1093
S.T.D.	Sólidos totales disueltos	14771	23963
H ₂ S	Acido Sulfhídrico	560	
CO ₂	Bióxido de Carbono	4000	
NH ₃	Amoníaco	22	

5.3.2. Comparación de costo de operación por kwh generado en planta termoeléctrica Rosarito y en la planta geotermoeléctrica -- Cerro Prieto en 1974.

	ROSARITO*	CERRO PRIETO
Costo de operación	\$ 94,973.000.00	\$ 25,061.000.00
Generación Neta	\$ 899,286,703.00 kwh	\$ 473,147,342.00
Costos de Kwh	0.1056	0.05732

* Estos costos se han incrementado fuertemente por el constante aumento del petróleo y derivados.

CAPITULO VI

USOS NO CONVENCIONALES

6.1 Resumen.

En nuestro país, el uso de la energía geotérmica para la generación de energía eléctrica se encuentra en un proceso de desarrollo que no ha llegado al máximo de aprovechamiento como un uso convencional, lo cual implica que usos no convencionales de la energía geotérmica como la extracción de sales, enfriamiento o calefacción de espacios y agua, etc, se tengan en etapas de estudios preliminares de factibilidad. Se puede pensar que esto es debido a la gran "riqueza" de México en hidrocarburos.

Pero este puede ser el momento de implementar programas de aprovechamientos para adaptar esta gama de experiencias geotérmicas en usos no convencionales a las características de desarrollo de nuestro país dado que se tienen recursos geotérmicos y humanos así como tecnológicos y económicos, y on base a esto se puede enfrentar el reto de utilizar integralmente la fuente geotérmica en sitios como Cerro Prieto, B.C., Los Azufres, Mich., La Primavera, Jal. y otros focos termales que según experiencias exploratorias cuentan con las condiciones propias para implantar la explotación convencional - - (generación eléctrica) y no convencional (secado, desalación, extracción, calefacción, refrigeración etc.)

La explotación integral podría incluso dar lugar a la realización de ideas como son: la posible creación de comunidades planeadas, y complejos industriales sobre todo el tipo químico, que redundarían en beneficios económicos-sociales para regiones de nuestro país que reúnan las condiciones para ello.

Es necesario aclarar que el materializar tal proyecto de explotación integral implicaría una planificación, organización, preparación y asistencia técnica y económica de instituciones de investigación y desarrollo, organizaciones y personal calificado interesado en el tema tanto Nacionales como Internacionales, lo cual se traducirá en un proyecto complejo pero útil al país.

Como el objetivo del presente trabajo no es éste, sino como ya se señaló es solo exponer de forma general pero clara lo que es la Geotermia y lo que puede significar en materia energética y no energética para nuestro país en un futuro cercano, por eso solo se señalarán algunos aspectos relacionados con el aprovechamiento no convencional del recurso, que podrían servir para desahogar inquietudes y que seguramente generarán otras ideas nuevas o complementarias que en un momento determinado pueden materializarse dando paso a beneficios y mejoras del proceso de explotación integral geotérmico.

6.2 Introducción.

La generación de electricidad a partir de energía geotérmica, es ahora el mayor punto de interés tanto en investigación como en desa-

rollo en nuestro país; pero en realidad existen otras alternativas donde la geotermia puede aplicarse, y que han sido objeto de poca o nula experimentación y valorización durante la explotación del recurso.

Desde luego que la prioridad que la generación ha tenido se debe entre otros factores; a la necesidad de tal tipo de energía en el país, al hecho de que se puede generar en el sitio mismo de producción de fluidos geotérmicos lo que implica además que se pueda transportar a relativamente grandes distancias para su consumo. Fuera de ello, existen otros factores que indican que las aplicaciones no eléctricas tienen un rango potencial mucho mayor; algunos de estos factores son: (1) las fuentes geotérmicas de temperaturas bajas y medias se ha estimado que son mayores que las de temperatura alta; (2). Una gran porción de necesidades de energía básica en el país son para calefacción a temperaturas bajas y medias; (3) Las necesidades anotadas en (2) son difíciles de satisfacer pues es un hecho termodinámico bien conocido que los combustibles fósiles presentan grandes irreversibilidades y pobre desarrollo termodinámico en equipos que se utilizan para ello; (4) Es la explotación racional e integral del recurso un factor que es de por sí el más importante, pues es producto de la necesidad de ahorro de energía.

Dentro de los usos no convencionales podemos citar los siguientes:

1) Usos agrícolas y afines.

- a) Invernaderos (Hungría Islandia, URSS, Japón).
- b) Crianza de animales como cerdos, cocodrilos, gallinas y lagartos (Japón).

2) Calefacción ambiental y de agua.

- a) Doméstica (Islandia, Hungría, Japón, Nueva Zelandia, URSS, U.S.A.)
- b) Industrial; procesado de celulosa y secado de madera Nueva Zelandia)
 - Preparación de explosivos plásticos (U.S.A.)
 - Secado de diatomitas - algas para harina- (Islandia)

3) Refrigeración.

- a) Doméstica (Nueva Zelandia)
- b) Industrial: Congelamiento seco de alimentos, refrigeradoras de - - absorción.

4) Desalación

- 5) Extracción Química (Italia, México a nivel experimental)

Adaptar cualquiera de estos usos en nuestro país podría significar ingresos, ahorros de combustible fósiles, y mejoras sociales a nivel rural y urbano, pues por ejemplo la extracción de sales produciría - (según características de Cerro Prieto) Potasio, Litio y otros compues^{tos} útiles en fertilizantes, lo cual contribuiría al desarrollo agrícola y consecuentemente incrementaría la producción en esa área.

En este estudio se presentará de una manera más explícita el aprovechamiento de la energía geotérmica en usos no convencionales, pero

sobre todo en lo relacionado con los puntos (2) y (5) antes mencionados, por ser según características de nuestros campos geotérmicos (energéticas y físico químicas) las más adaptables.

6.3. Sistemas de calefacción y enfriamiento geotérmico de espacios, así como de calentamiento de agua.

La calefacción y enfriamiento de espacios significa crear un clima artificial en un espacio confinado, tal como una casa, hospital, industria, etc., en las cuales la temperatura es independiente de las condiciones del clima exterior. Esto requiere pues de un gasto de energía en una forma u otra. La tradicional fuente para ello son combustibles variados todos ellos derivados del petróleo.

La energía geotérmica se ha usado para estos propósitos por largo tiempo y a gran escala en varias décadas anteriores. En estos momentos la operación representa una de las aplicaciones más prósperas de la energía geotérmica. No solo ha sido excepcionalmente económica para el consumidor sino que también a revalorizado el medio ambiente por la limpieza del recurso geotérmico en relación con los distintos combustibles fósiles usados en ello.

6.3.1. Factores Técnicos y Económicos.

En este punto se pretende contestar dos preguntas las cuales podrían plantearse ahora (1) ¿Cuales son los factores principales que controlan la economía de la calefacción o enfriamiento de espacios? y (2) ¿Cual es la máxima distancia económica a la cual los -

fluidos geotérmicos pueden ser transmitidos de la fuente hasta el lugar de utilización?

La estructura del costo de la energía geotérmica entregada al consumidor dependen de tres parámetros principales que son: costo de producción en la fuente, costo de transportación a grandes distancias, y costo de la distribución dentro del área comercial; también del nivel de temperatura, factor de demanda (carga) y el tamaño del área comercial. Con todo ello se puede determinar la máxima distancia comercial.

Los parámetros que influyen principalmente los factores técnico-económicos son: a) Factores de consumo. Estos son la relación entre demanda promedio anual a demanda máxima anual, y dependen de factores climáticos como: (1) Mínima o máxima temperatura exterior (2) número de "grados-día" anuales requeridos para calefacción o enfriamiento (Un "grado-día" es cada 1°C de cambio a partir de la temperatura de base en el interior del lugar por acondicionar).

Para el diseño además es necesario conseguir curvas de duración típica de la temperatura media diaria anual, es decir el número de días al año con temperaturas exteriores, más bajas respecto a cualquier temperatura t °C. La demanda de calor es proporcional a la diferencia entre temperaturas de diseño del lugar y la temperatura exterior a este.

Desde luego que implantar algo así podría ser para distritos enteros o casas individuales y manejado por el Gobierno o particulares,

según el caso (Reykjavik Islandia es un ejemplo).

6.3.2. Sistemas geotérmicos prácticos de calefacción y calentamiento.

En acuerdo a varias experiencias y características de los manantiales geotérmicos, científicos rusos han desarrollado varios esquemas de utilización del calor de fuentes hidrotérmicas. Estos estudios pueden adaptarse a nuestros campos pues las condiciones que los mismos requieren son parecidas a las características físico-químicas y térmicas de nuestros campos aunque claro está que las condiciones de los lugares de aplicación son diferentes.

No es propósito de este trabajo en este caso hablar sobre aspectos de diseño de equipos y sus variables que se consideran para ello en cada proceso, sino más bien, comentar los aspectos generales de estos.

Con la aclaración anterior podemos proceder al trato de los procesos o esquemas de aprovechamiento de el agua geotérmica en calefacción de espacios y/o agua para uso doméstico o industrial, que bien podrían implementarse en México dado que los recursos y variaciones climatológicas hacen pensar en esto como una posibilidad importante en los niveles doméstico e industrial sobre todo.

Por sus características generales el agua geotérmica de interés práctico en los esquemas, se puede presentar en dos casos, (de acuerdo con los cuales se adapta el esquema más útil) ellos son:

a) Caso 1

El manantial de agua geotérmica tiene una alta temperatura, arri-

ba de 80°C pero está altamente mineralizada. En este caso son necesarios cambiadores de calor intermediarios. Los principios del esquema se muestran en la fig. VI. 1. Aquí el agua geotérmica proveniente del pozo es subdividido en 2 flujos paralelos. Uno se dirige hacia el intercambiador de calor del sistema calefactor y luego el agua sobrante entra al cambiador de calor de la primera etapa de calefacción para abastecimiento de agua caliente. El segundo flujo va hacia el cambiador de calor de la segunda etapa del sistema de abastecimiento de agua caliente.

B) Caso 2

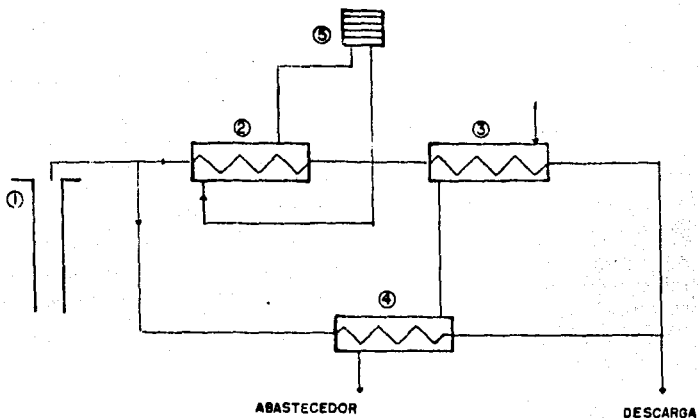
El manantial de agua geotérmica tiene un bajo grado de mineralización y un bajo potencial de calefacción (temperatura abajo de 80°C).

Bajo tales condiciones se requiera incrementar el potencial calorífico del agua geotérmica del manantial. Es posible conseguir esto de varias maneras. Consecuentemente, se pueden obtener esquemas diferentes con sus respectivas modificaciones. Consideramos algunos:

- 1) Un sistema con entrega paralela de agua geotérmica a una red de suministro de agua caliente y el agua sobrante para alimentar un sistema de calefacción con punto máximo (Fig. VI.2).
- 2) Un sistema de calefacción geotérmica sin descarga (Fig. VI.3).
- 3) Un sistema con aplicación de la bomba de calor (Fig. VI.4).

Implementar cualesquiera de estos esquemas a campos geotérmicos del país significaría aprovechar más económicamente los focos geotérmicos, pues los recursos de bajas temperaturas no útiles en generación

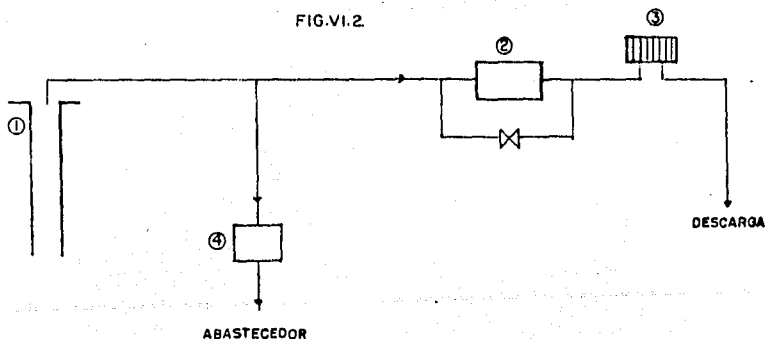
PRINCIPIOS DE ABASTECIMIENTO DE CALOR GEOTERMICO



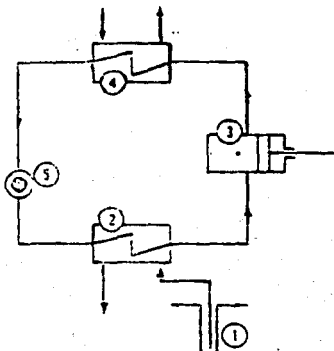
(1) Pozo, (2) Intercambiador de calor del Sistema de calefacción, (3) Intercambiador de calor de la primera etapa, (4) Intercambiador de calor de la segunda etapa, (5) Sistema de calentamiento.

(1) Pozo, (2) Calentador extra con punto máximo (3) Sistema de calefacción, (4) Acumulador.

FIG.VI.2.

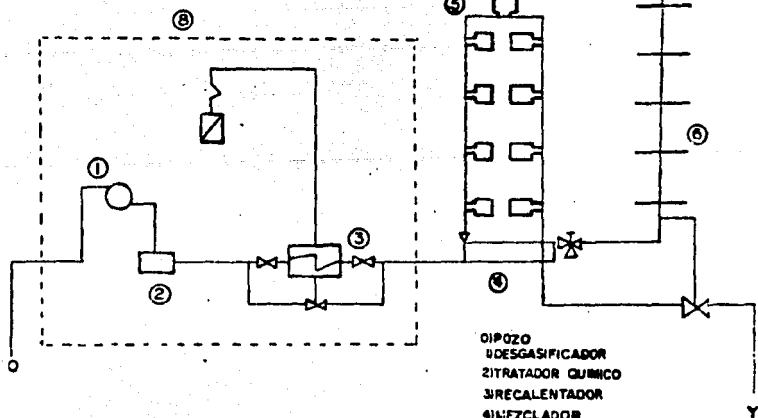


HACIA EL SISTEMA DE CALEFACCION.



- 1 POGO
- 2 EVAPORADOR
- 3 COMPRESOR
- 4 CONDENSADOR
- 5 VALVULA CONTROL

FIG. V. 4



- 0 POGO
- 1 DESGASIFICADOR
- 2 TRATADOR QUIMICO
- 3 RECALENTADOR
- 4 INECLADOR
- 5 CALEFACTOR
- 6 BASTECEDOR DE AGUA CALIENTE
- 7 ACUMULADOR
- 8 CALDERA

FIG. V. 3

podrían ser utilizados para los fines de acondicionamiento de espacios y abastecimiento de agua caliente para uso doméstico e industrial.

Esto claramente repercutiría en mejoras sociales y económicas de lugares cercanos a la región geotérmica y aún los alejados de esta.

Lo anterior puede ser posible, pero claro está que para su implementación en diferentes campos se tendrá que analizar los particulares de los mismos, así como, los factores tales como temperatura anual promedio, características fisicoquímicas, térmicas, climáticas, institucionales, financieras, etc. Es decir, que se tendría que realizar un estudio técnico-económico de factibilidad y posible aplicación de experiencias desarrolladas en materia de control de temperaturas de espacios y calentamiento de agua, implementados en otros países pero aún no desarrollados en el nuestro.

6.4 Extracción de sales de Potasio y Litio a partir de la salmuera -- geotérmica desechada en Cerro Prieto.

Dentro de los proyectos de usos no convencionales de la energía -- geotérmica, tiene singular importancia aquel de aprovechamiento de -- las sales contenidas en la salmuera que se desecha en la planta Cerro Prieto, pues a partir de ella se puede lograr la extracción de sales de potasio y litio que son de gran interés para México, sobre todo -- porque su explotación contribuiría a la independencia económica de -- nuestro país dado que ambos compuestos son importados a precios que significan una alta fuga de divisas. Estas sales son de importancia

primaria, sobre todo la sal de potasio porque se usa en preparación de fertilizantes los cuales son de gran repercusión y uso en agricultura, pues su empleo implica un probable incremento alimenticio; que aparte del problema energético es otra de las preocupaciones del mundo, y la sal de litio por su aportación estratégica en el terreno nuclear que esta muy próximo a desarrollarse en nuestro país.

Desde el punto de vista de un aprovechamiento integral de los fluidos geotérmicos, la extracción de sales presenta una alternativa no energética económicamente explotable por varias razones. En primer lugar, porque se aumenta la eficiencia de explotación de tales fluidos, lo cual significa una ganancia adicional. En segundo lugar, la extracción de estas sales permite controlar de mejor manera la contaminación, que de otra forma estas sales podrían causar en la superficie.

Dado que el proyecto es interesante enseguida se presenta un panorama más detallado del mismo.

La planta Cerro Prieto se puso en operación (unidades 1,2) en 1973 con una capacidad de generación de 75 MW alimentada con el vapor obtenido de 15 pozos geotérmicos de 1,300 mts. de profundidad de los que se extrae una mezcla de vapor-agua, separándose en 750 t/h de vapor que es enviado a generación y 1,800 t/h de salmuera. Esta última en su mayor parte se envía a una laguna, otra se flashea y una mínima parte se descarga al río Hardy; siendo la salinidad de tal salmuera -

de 26,000 ppm (Tabla VI.1).

Tabla VI.1

Composición típica de Salmuera geotérmica de desechos de Cerro - - Prieto (agua separada a presión atmosférica de pozo M-5).

Componente	ppm	Componente	ppm
Na	9062	F	2
K	2287	SO ₄	6
Li	38	CO ₃	2
Ca	520	H ₂ CO ₃	74
Mg	1		
B	14	Fe	0.3
SiO ₂	1250	Salinidad	26,442
Cl	16045	pH	7.7
Br	31	Conductividad	32,200

Tabla VI.2

Salmuera disponible en relación con la capacidad instalada en Cerro Prieto.

PLANTAS GENERACION	CAPACIDAD INSTALADA	DESECHO DE SALMUERA Ton/hr.	M ³ /AÑO (MILLONES M ³)
CPI (1,2)	75	1,800	15.76
CPI (1,2,3, y 4)	150	3,600	31.53
CPI (1,2,3,4,y 5)	180	3,600(*)	31.53
CPI+CPII (1)	235	4,700(*)	41.17
CPI+CPII (1,2)	290	5,800	50.80
CPI+CPII (1,2,y 3)	345	6,900	60.44
CPI+CPII (1,2,3, y 4)	400	8,000	70.08

* Baja presión no se incrementa desecho.

** Unidades de 55 MW de presión mixta.

CPI+Cerro Prieto uno. CPII = Cerro Prieto dos.

Actualmente la planta Cerro Prieto ha incrementado su capacidad de generación hasta 150 MW por lo que el agua desechada representa -

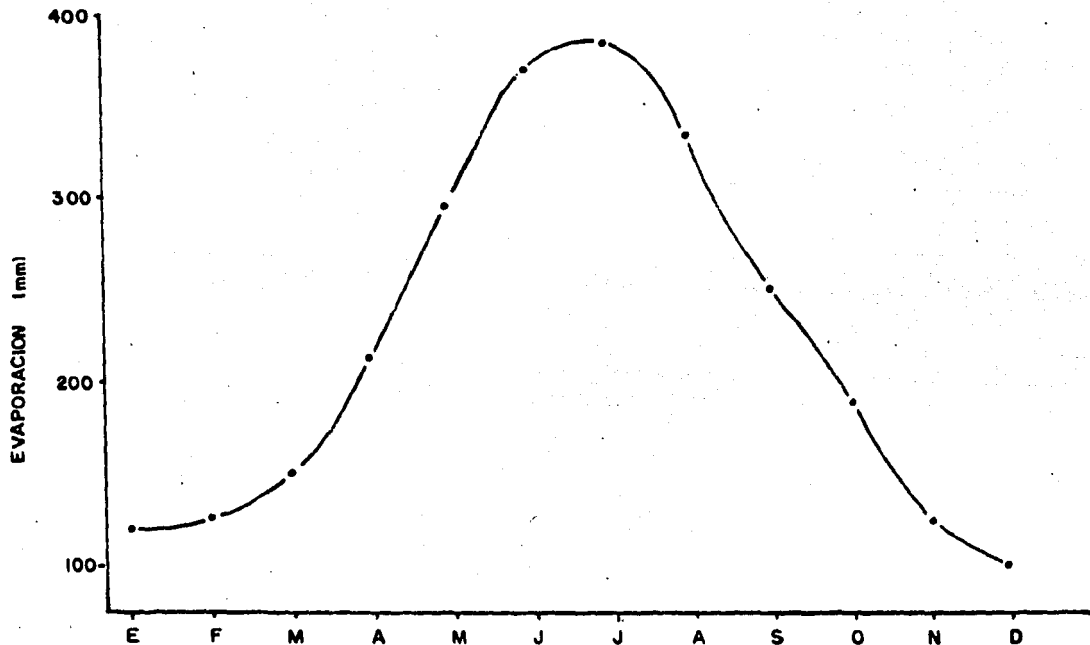
el doble (3,600 t/h), además por los proyectos que CFE tiene hasta 1984, tendientes a aumentar su capacidad hasta 620 MW el flujo de salmuera crecerá a más de 8,000 t/h. (tabla VI. 2) ello desde luego trae por consecuencia el tomar medidas alternativas para solucionar el problema de falta de capacidad de la laguna y la contaminación - que la salmuera puede ocasionar. Tales medidas son:

- a) Construcción de un canal revestido de concreto (para evitar afectar tierras cultivables), que lleve los efluentes hasta el Mar - de Cortés.
- b) Reinyectar la salmuera (considerando para ello los efectos en el yacimiento que ésta ocasionaría debido a gradientes de concentración de sales, temperatura y presión).
- c) Extracción de sales de k, Na, Li, principalmente.

Considerando la alternativa (c) de extracción de productos químicos de interés vemos que por la baja precipitación pluvial y la gran intensidad solar, que origina una evaporación de 2,500 mm/año (fig. VI.5) La salmuera puede concentrarse en la laguna y luego por la saturación producto de la insolación, cristalizar. Con objeto de alimentar la planta construída, las sales se obtienen de las lagunas de evaporación solar (fig. VI.6), además en ellas se estudió el comportamiento de las principales sales en base a la salinidad y densidad de la salmuera (tabla VI.3 y fig. VI. 6 A).

Como las sales precipitan a medida que la densidad total crece

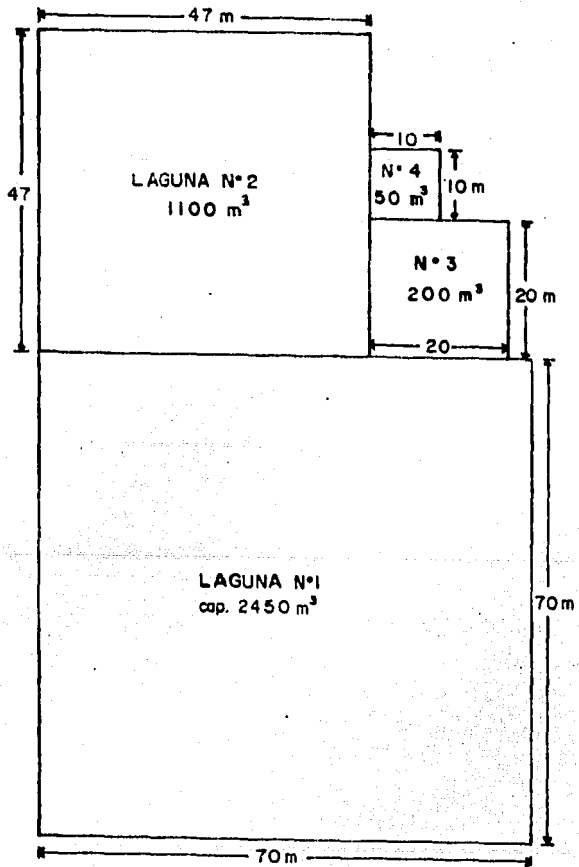
FIG.VI.5.



CURVA TIPICA DE EVAPORACION SOLAR EN EL AREA DE CERRO, PRIETO

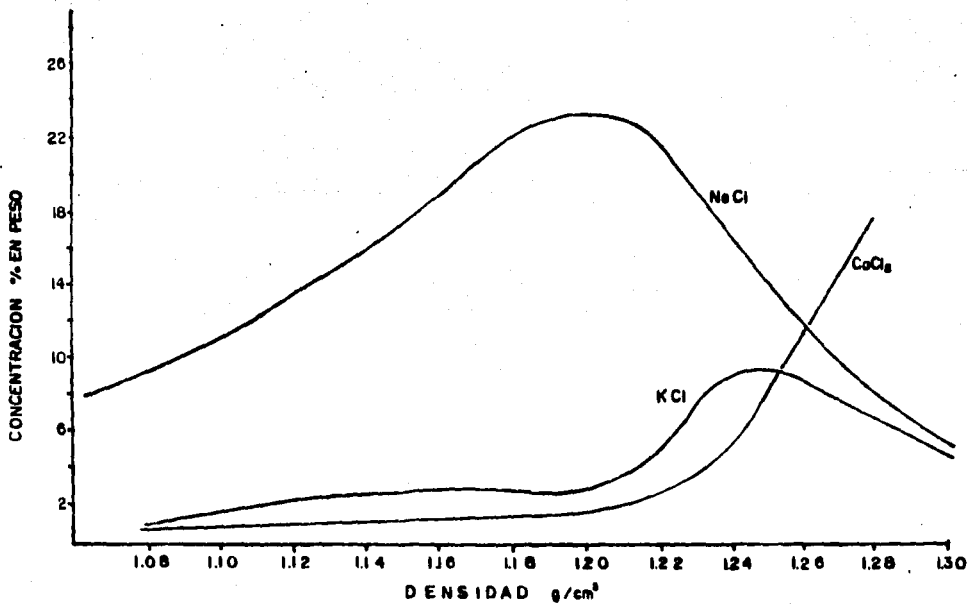
(2 660 mm/año)

FIG.VI.6.



LAGUNAS DE EVAPORACION SOLAR

.115.
FIG. 6A.



VARIACION DE LA CONCENTRACION DE NaCl KCl CaCl₂ vs DENSIDAD

(por efecto de la evaporación solar) estas se pueden separar fácilmente como se ve en la fig. VI. 6A; donde los máximos corresponden a la saturación de cada sal y de aquí en adelante cristalizan y precipitan, luego se separan.

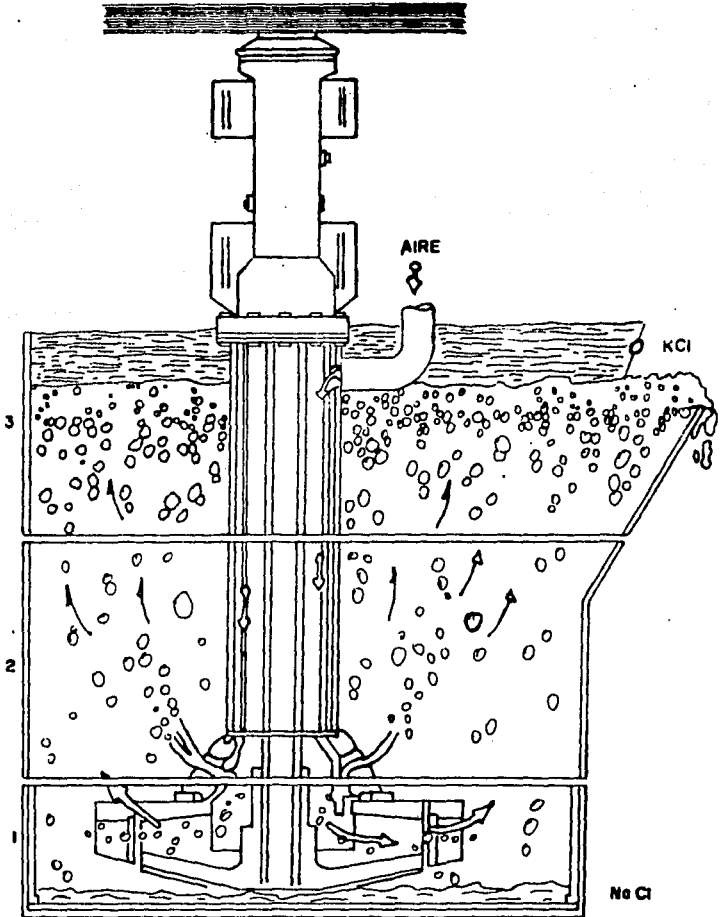
Las sales de Na y K se obtienen en la 4a. laguna en una relación 2:1 las cuales forman la materia prima de la planta piloto. El LiCl (1.36%) y CaCl_2 (16%) se separan en la 5a. laguna. El LiCl continúa concentrándose hasta 4%, siendo esta la materia prima para obtener el Li_2CO_3 .

El medio de separación de las sales después de un estudio sobre diferentes métodos para ello, resultó ser la flotación (fig. VI.7) - después es la que más se adecúa a ese tipo de salmuera.

Una vez montada la planta piloto (previo diseño y selección de equipo adecuado) se variaron muchos parámetros como son: tamaño de partícula, mezclado de salmuera-cristales (lechada), cantidad de acondicionadores y reactivos de flotación, tiempo de residencia en las celdas, lavado, filtrado, etc., hasta obtener buenas eficiencias (80%) y purezas adecuadas (96%) para la comercialización del KCl que por ahora es el más interesante por ser totalmente importado (Tabla VI.4 y Fig. 8).

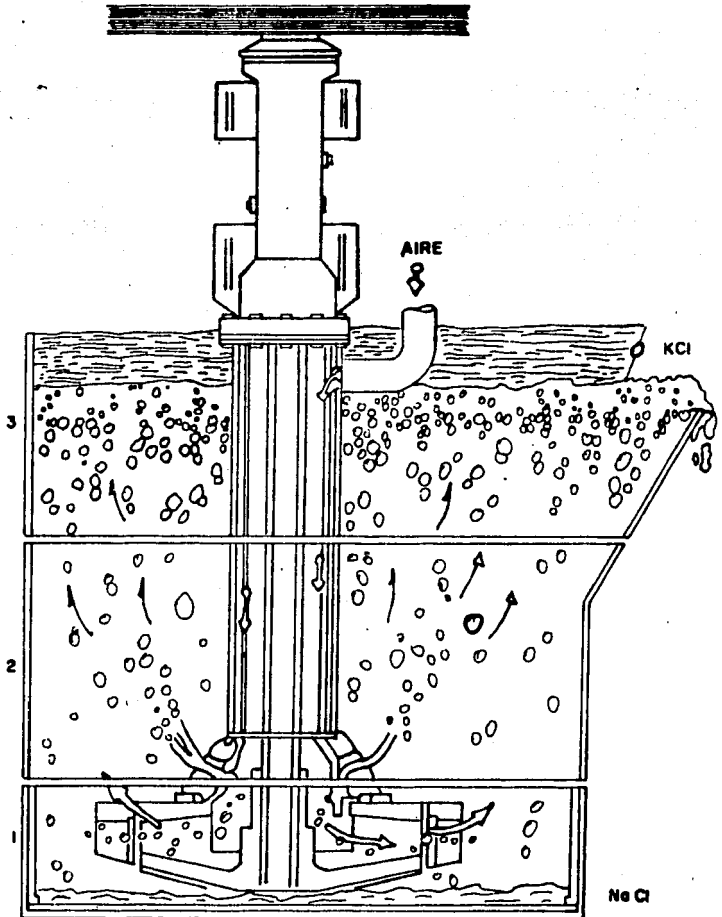
Economicamente hablando la proyección a nivel comercial se está llevando a cabo y las condiciones favorables para comercializar el KCl extraído de la salmuera resultan ser muy positivos pues en primera instancia con la capacidad actual de generación se pueden obtener

CELDA DE FLOTACION DE LABORATORIO



FIGV.7.

CELDA DE FLOTACION DE LABORATORIO



FIGV.7.

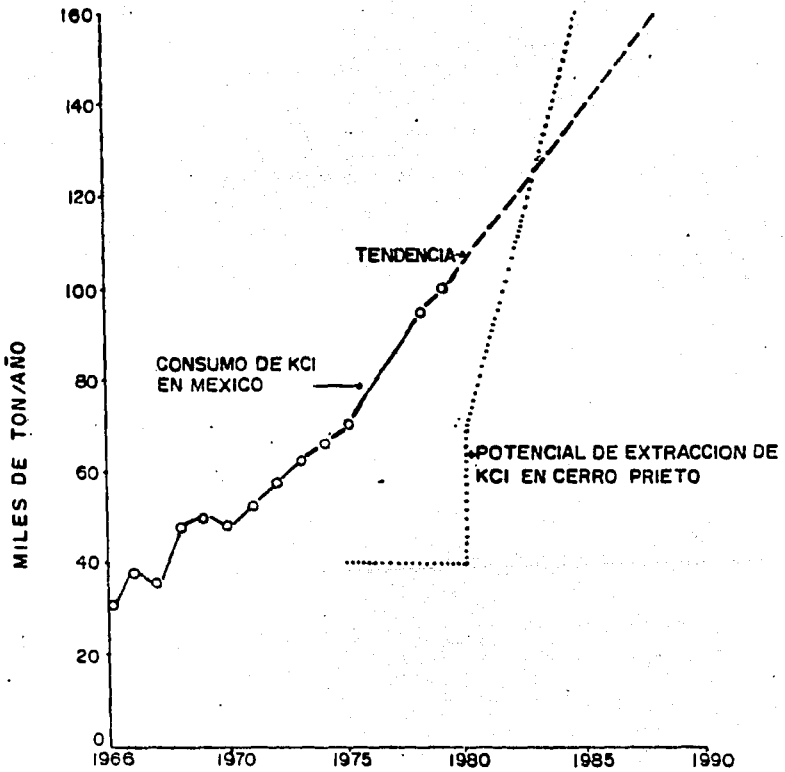


FIG. VI.8

cantidades de tal magnitud (70,000 t/a) que podrían cubrir 2/3 de lo que se importa, a precios por toneladas iguales a un medio de los precios de importación (500 pesos M.N.) y luego con la ampliación de la planta a 620 MW para 1984 se podría obtener una capacidad mayor a 200,000 ton/a para cubrir la demanda nacional totalmente y hasta se podría exportar, pues el potencial geotérmico de la zona se estima entre 1,000 y 1,500 MW (Tabla VI.4)

Con respecto al LiCl que se desecha una vez cristalizado el cloruro de potasio, se estudiaron métodos para separarlo como son: extracción por solventes y el de precipitación como Li_2CO_3 , siendo este último el mejor por su eficiencia de separación. El equipo de esta planta piloto aún está siendo comprado para luego montarla.

Tabla VI.4

Potencial de extracción de KCl en Cerro Prieto

AÑO	GENERACION MW	EXTRACCION KCl TON/AÑO	COSTO APROX. MILLONES PESOS (1)
1973-78	75	45,000	73
1979	150	90,000	145
1981	180 (2)	90,000	145
1982	235 (3)	117,000	188
1982	290	145,000	233
1983	345	173,000	278
1984	620	200,000	322

(1) Base costo de importación de 70 US Dlls/ton.

(2) Adición de baja presión de 30 MW (no incrementa desecho)

(3) Adición de unidades de 55 MW de presión mixta.

Existen ventajas en la zona que favorecen totalmente el proyecto comercial de explotación de sales, los cuales son entre otras: -

materia prima en abundancia (pués se cuenta con otros depósitos de agua termomineral de baja entalpia aparte de los desechos de la planta), vapor de bajo costo, onergía eléctrica en abundancia para el -- proceso de extracción, evaporación solar intensa, terreno suficiente, buenas comunicaciones, ciudades cercanas (Mexicali, Sn. Diego) zona libre de impuestos etc.

El diagrama de flujo de proceso para la extracción de sales de potasio se ve en la fig. VI.9.

6.5. Creación de Comunidades Planeadas y Complejos Químicos.

Una de las ideas fascinantes con más interés e importancia, es la posible aplicación de los recursos geotérmicos tendientes a integrar los beneficios energéticos y no energéticos (usos no convencionales) hacia la creación de comunidades planeadas y complejos industriales de tipo químico que de una forma u otra puedan servirse mutuamente para cubrir, sus necesidades. Es decir que por un lado la comunidad por ejemplo brinde la mano de obra y quizá el mercado para los productos químicos y por la otra parte que el complejo químico proporcione la fuente de trabajo, productos y servicios que cubran parte o todas las necesidades de la comunidad.

Esta idea de establecimiento mutuo de relaciones complejo-comunidad podría traducirse en una forma mejor de aprovechamiento de los recursos geotérmicos y una manera más justa de repartirse los beneficios que el recurso proporcionará, dado que la explotación por ejem-

PLANTA PILOTO DE KCl

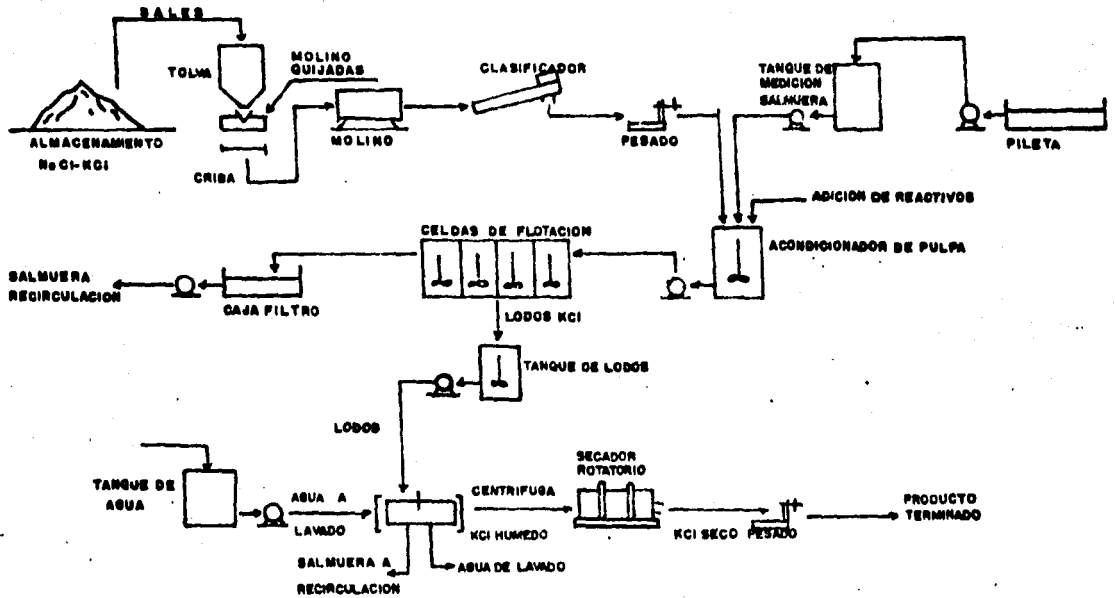


FIG.V.9

plo, de sales como potasio y fuentes de bajas temperaturas se significarían por su aporte en terreno agrícola (las sales de potasio usadas en fertilizantes) y de confort humano (sistemas de clima controlado y servicio de agua caliente) que finalmente son mejoras sociales que la comunidad o el mismo país podrían obtener.

Razones para plantear lo anterior las hay, dentro de las cuales destacan las siguientes: (Los cuales no están en orden jerárquico - pues su interrelación y repercusión son difíciles de distinguir)

(1) El recurso geotérmico existe en buena medida tanto en exploración como en explotación en una área grande y definida del país; área que esta conformada por la faja Neovolcánica ubicada en la parte central del país que abarca desde las costas de Nayarit hasta las de Veracruz, así como la costa del Pacífico. Además las condiciones térmicas y fisicoquímicas de los principales focos termales en explotación y exploración son adecuadas para fines señalados pues basta con observar los mapas y tablas de los capítulos de Reservas y Recursos así como el de Explotación para darse cuenta que la afirmación anterior tiene sentido y validez; (2) Razones económicas como son financiamiento tanto en exploración como explotación existen, y prueba de ello es que el Estado Mexicano a través de la CFE apoyada por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), Coordinadora Ejecutiva de Cierro Prieto, Instituciones como el Instituto de Geofísica de la UNAM, y otros, organismos Internacionales como OLADE; han canalizado un capital que

cierto grado muestra el interés por la evaluación y desarrollo del recurso geotérmico pero que aún requiere de un incremento sustancial para un mejor aporte en este renglón.

Lo anterior se puede constatar en las inversiones que se han hecho en Cerro Prieto en materia de producción y las investigaciones exploratorias que en éste lugar y otros campos como Los Azufres Mich. y la Primavera, Jal. se están realizando. (3) Respecto al apoyo intelectual y técnico de Instituciones y Organismos Nacionales e Internacionales, este; es relativo pues como ya señalamos hay personal científico tanto en investigación y desarrollo que podrían participar en el análisis más exhaustivo de la idea que aquí se señala referente a la creación de la dupla comunidad-complejo con el propósito de establecer si se puede materializar en un lugar, o de plano es inoperante. Es decir la tecnología ya existente y el personal técnico científico que puede implementarla existen ya en nuestro país, sería cuestión de adquirir más bien el material y equipo en otras instituciones nacionales o extranjeras como son por ejemplo: tuberías, intercambiadores de calor, instalaciones eléctricas, etc., siendo aquí donde la industria privada podría participar con apoyo de este tipo. --

(4) Los factores técnicos económicos que hacen más interesante y factible la idea son por ejemplo: los relacionados con la transportación y electricidad y productos químicos que en un momento dado pudiesen producirse en el complejo; pues por un lado las pérdidas energéticas en el primer caso son significativas sobre todo si la distancia de -

transportación es relativamente grande, lo cual repercutiría en pérdidas; y por el otro lado el transporte de productos y beneficios - hacia lugares de consumo (mercado) alejados se traduce en un alto costo para el usuario o consumidor. Lo cual podría evitarse al -- crear los centros mencionados en el área misma de producción de flujos geotérmicos. Claro está que el beneficiarse de los recursos geotérmicos se limita a aquellos lugares con condiciones adecuadas y requeridas para el fin señalado principalmente, pero que en determinado momento podrían hacerse extensivas si los recursos fueran suficientemente explotados como para abastecer las necesidades regionales, al área nacional, lo cual por ejemplo, podría suceder si la producción de energía fuera excesiva, así como las sales de potasio, al grado que la interconexión con el sistema eléctrico nacional se pudiera lograr por un lado, y además, que la sal en forma de fertilizantes fuera tal que cubriera las necesidades de la región y luego extendiera su distribución al área nacional. Esto último se puede incluso lograr con la sola producción de sales de potasio en Cerro Prieto.

(5) En materia de políticas energéticas existe también una buena coyuntura que puede servir de apoyo a la fortificación y realización de la idea, pues en tiempos recientes se ha venido dando singular importancia a la diversificación energética y ahorro de energía con el fin de un aprovechamiento integral de cada una de ellas. Además esto es necesario pues el desarrollo avisto de esta manera es más racional y beneficioso para nuestro pueblo.

Cifras relacionadas con respecto a inversiones en materia Geotérmica son difíciles de conseguir (con excepción de Cerro Prieto) pero el programa de obras que se presenta en el capítulo de Explotación de este trabajo, deja entrever el interés y el apoyo que se esta brindando a el desarrollo geotérmico y que se puede comprobar por los resultados positivos que Cerro Prieto ha tenido.

Los beneficios que podrían conseguirse con la realización de la idea podrían ser tanto a nivel urbano como rural y en sus respectivos sectores como son el doméstico, productivo y de servicios, pués en todos se requiere de electricidad, en el rural fertilizantes, y tal vez de espacios de clima controlado en todos.

Todo lo expuesto hasta ahora hace palpar lo importante que sería el materializar una idea como la expuesta, pero es necesario señalar que para implantar un complejo y una comunidad como las señaladas se requiere de un riguroso estudio de factibilidad técnico- económico - que contemple aspectos propios del recurso como temperatura, extensión etc., y aspectos propios de la política energética que el país siga en un momento dado; pués puede ser que otros puntos tengan más interés en ese momento de tal suerte que acaparan la atención de los planeadores de la economía nacional, como sucede ahora con el petróleo, y aspectos propios de la región donde se pretende implantar la comunidad y complejo como son: población, características climáticas, e ingresos entre otros.

A grandes rasgos son estas las razones principales que partici-

pan en el planteamiento de la idea pero que de ninguna manera son -
todas pués probablemente se pueden agregar algunas otras de tal suere
te que al conjuntarse ofrezcan un panorama más amplio y claro de la
trascendencia e interés del planteamiento señalado.

CONCLUSIONES GENERALES.

Aún cuando México es un país que posee una amplia gama de recursos naturales energéticos (fósiles, minerales y alternativos), su dependencia en este renglón de los hidrocarburos es muy pronunciada pues alrededor de 90% de sus requerimientos energéticos se satisfacen de combustibles fósiles encabezados por derivados del petróleo y solo el 10% restante através de hidroelectricidad, carbón y fuentes alternas (geotermia). Además aunado a ello la constante elevación de precios de combustibles petrolíferos y fósiles en general, y su carácter no renovable de éstos, así como la "rara" sequía que se vive en materia hidroeléctrica, debe servir como catalizador para que el desarrollo de las fuentes alternativas se refuerce en su participación, con el objeto de coadyuvar con otros energéticos a la satisfacción de necesidades energéticas que se dejan sentir cada vez más - producto de la crisis energética mundial, la cual seguramente se agravará aún más si el desarrollo de fuentes alternas sigue olvidado.

Nuestro país al igual que la mayoría de economías del orbe, centra su atención en los combustibles fósiles y más justamente sobre el petróleo, relegando en cierta medida la riqueza energética de otras procedencias como la del sol, mareas, viento, bioenergía, microhidroelectricidad, geotermia y nuclear sobre todo.

Es ahora pues cuando debemos iniciar el desarrollo pleno de las fuentes alternativas con el objeto de que conjuntamente con el uso -

más eficiente de las fuentes convencionales resuelvan el problema nacional primero y posteriormente contribuyan al enfrentamiento de la crisis energética mundial.

Una muestra clara de la significación de las fuentes alternativas, la ha dado la energía geotérmica pues ha proporcionado al país una rotunda y positiva demostración de su importancia eléctrica, (1 a 2% de la aportación total nacional) con sus 150 MW solo en Cerro Prieto que significan ahorros de más de 2×10^6 b/a y arriba de 5×10^6 b/a en 1984 cuando la capacidad sea de 620 MW pudiendo crecer aún más con la explotación integral futura. Aparte de la aportación eléctrica se -- significa (aunque no comercialmente aún) por su contribución en el -- terreno no convencional mediante su uso en producción de sales de potasio y litio, ácido sulfhídrico, desalación de agua, y otras aplicaciones que al igual que las anteriores aún no se implementan en México, como calefacción de espacios, calentamiento de agua, producción de vapor y agua caliente de proceso, secado, etc., pero que indudablemente servirán de manera importante al desarrollo integral del recurso y aportarán beneficios sociales, tecnológicos y económicos al país cuando se comercializen los ya experimentados en otros países pero aún no estudiados en el nuestro, y se implemente estos y otros no solo en Cerro Prieto único campo en explotación, sino en los demás focos termales con características térmicas y fisicoquímicas para generación eléctrica, y los usos no convencionales ya señalados que puedan aplicarse en cada caso particular.

En pocas palabras hablando estrictamente a nivel geotermia, este es un recurso que aún no se desarrolla plenamente en México, pues -- aunque ciertas instituciones como CFE, IIE y centros Docentes como la UNAM y Universidad de Baja California se han preocupado en ello, es evidente que falta más exploración del recurso, al nivel digamos de recursos fósiles, así como más personal preparado para ello pues a pesar de los esfuerzos que estas instituciones y otras están realizando en éste último punto, aún se tienen insuficiencias. Sin embargo, - existen alicientes para que el recurso se desarrolle en plenitud como son sus excelentes resultados en cuanto a generación eléctrica, su - abundancia (arriba de 13,000 MW ahora), el más bajo costo que existe de producción eléctrica (como consecuencia de aumento del combustible) su limpieza e impacto menor en la ecología, por el lugar privilegiado, que ocupamos en este renglón (cuarto lugar Mundial), y sobre todo por ser la única fuente energética explotada con tecnología mexicana.

En síntesis desarrollar integralmente la alternativa geotérmica significa y significaría ahorrar combustibles fósiles y minerales, empezar a fundamentar una economía tendiente a depender cada vez menos de los hidrocarburos, utilizar más justamente las fuentes alternas de energía en beneficio de los sectores más pobres e integrarlos a un mejor nivel de vida para que así se signifiquen en el mercado, mejorar el medio ambiente saneandolo de la gran contaminación fósil, aumentar la oferta de energía eléctrica y mano de obra al ampliar su explotación con la posibilidad de conectar su producción a la Red Nacional ó Expor

tarse como ya se hace, contribuir al problema alimenticio mediante el aporte que las sales de potasio tienen en la preparación de fertilizantes y que se pueden obtener de otros campos además de Cerro Prieto, iniciar la independencia tecnológica y económica conjuntamente con el aporte de otros recursos, crear complejos químicos y comunidades planeadas que aprovechen los usos convencionales y no convencionales del recurso más eficiente.

En suma el uso de la geotermia no es la solución al problema -- energético, pero si una alternativa que al aprovecharse conjuntamente con otras fuentes convencionales y no convencionales brindará una mejor oportunidad de independencia tecnológica y económica a nuestra patria.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- (3) Blair I.M., Jones B.D., Van Horn A.J., "ASPECTS OF ENERGY CONVERSION". Ed. Oxford, New York, 1976.
- 2.- Comisión de Conservación de la Conferencia Mundial de la Energía, "ENERGIA GEOTERMICA", World Energy Resources 1985-2020 1977.
- 3.- Comisión Federal de Electricidad, " REUNION SOBRE DIVERSIFICACION DE ENERGETICOS PARA PRODUCIR ELECTRICIDAD", CFE, Cerro Prieto B.C.N. Abril. 1979.
- 4.- Coordinadora Ejecutiva Cerro Prieto (CFE) - United States - Departament of Energy (DOE) Division of Geothermal Energy, "FIRST SYMPOSIUM ON THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD, BAJA CALIFORNIA. MEXICO", CFE-DOE, San Diego Calif., Sep. 20-22, 1978.
- 5.- Christopher H. and Armstead H., "GEOTHERMAL ENERGY", Ed. - Wiley, New York, 1978.
- 6.- (7) Dorf. C. Richard "ENERGY RESOURCES & POLICY", Wesley Pu. Co., 1978.
- 7.- Ellis A.J. and Mahon W.A.J., "CHEMICAL AND GEOTHERMAL - - SYSTEMS", Academic Press, New York, 1977.
- 8.- PEMEX, "EL PETROLEO", PEMEX, XV Edición, 1976.
- 9.- (1) Goguel Jean, "GEOTHERMICS", Mc Graw-Hill Book Co., 1976.
- 10.- Malacy D.S. Jr., "TIERRA, AGUA, VIENTO Y SOL", Ed. Nuevomar S.A., México, 1977.
- 11.- Herman, Cannon, Stewart W., "ENERGY FUTURE", Ballinger Pub. Co., 1977.
- 12.- Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), " LIBROS -- AZULES" (Compendio de documentos Geotérmicos , Sin lugar, fecha ni edición).
- 13.- Jerrold H. Krenz, "ENERGY: CONVERSION AND UTILIZATION", Boston, 1976.
- 14.- Kruger P. and Otte Carel, "GEOTHERMAL ENERGY", Kruger-Otte, Stanford Calif., 1973.

- 15.- (10) Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) - Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), "II SEMINARIO DE EXPLORACION GEOTERMICA FASE FACTIBILIDAD", OLADE-CEL, - Sn Salvador, 30 de Abril - 4 de Mayo, 1979.
- 16.- Postigo Luis, "EL MUNDO DE LA ENERGIA", Ed. Sopena Barcelona, 1965.
- 17.- PNUD-OLADE, "REQUERIMIENTOS FUTUROS DE FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGIA EN LA AMERICA LATINA", PNUD-OLADE, Quito, Ecuador, Junio, 1979.
- 18.- PNUD-PNUMA-OLADE, "ALTERNATIVAS ENERGETICAS EN AMERICA LATINA", Quito, Ecuador, Octubre, 1979.
- 19.- 10 th World Energy Conference, "UN CONVENTIONAL ENERGY -- RESOURCES STUDIES OF DEVELOPMENT", Istanbul, Sep. 19-23, División 4 p. 4.3 - 1, 1977.
- 20.- Verlag Hoder KG., "GEOLOGIA Y MINERALOGIA", Ed. Rioduero, Madrid, 1974.
- 21.- (2) Workshop en Alternative Energy Strategies (WAES), "ENERGY: GLOBAL PROSPECTS 1985-2020", Mc. Graw-Hill Book Co., 1977.

Revistas, Boletines y Reportes Especializados:

- 1.- Actualidad Energética Latinoamericana, Marzo 1979.
- 2.- Comercio Exterior Julio, 1979. p. 758
- 3.- CFE "PLANTA GEOTERMoeLECTRICA CERRO PRIETO", Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto (CFE), 1980.
- 4.- Revista Mexicana del Petróleo, May-Jun, Jul-Ago, 1979 págs. 14, 53-56.
- 5.- Sector Eléctrico, "GEOTERMIA", CFE, No. 25, Mayo, 1979.
- 6.- (11) Dirección General de Energía (SEPAFIN), "BOLETIN -- ENERGETICOS", Año 2 No. 8, Ago, 1978; Año 3 No. 3, Marzo, 1979; año 4 No. 4, 5 Abril y Mayo, 1980.
- 7.- (5) IIE, "BOLETIN IIE", Vol. 1 Nums. 1, 3 Mayo y Junio, 1977; Vol. 2 Num. 11, Nov. 1978; Vol. 3 Nums. 4, 10 Abril y Octubre 1979; Vol. 4 Núm. 6, Junio, 1980.
(8) Circular No. 726 Servicio Geológico de E.U.
- 8.- Depto. Geotermia (CFE), "ENERGIA GEOTERMICA POTENCIAL - MINIMO DE GENERACION ELECTRICA" Depto. Geotermia (CFE), 1977.
- 9.- González S. Arturo, "ESTADO ACTUAL DE LA GEOTERMIA EN MEXICO", Depto. Geotermia (CFE), Sn. Salvador, Mayo 1979.
- 10.- Gutiérrez Gil R., "PROBABLE ORIGEN DE LAS ALTAS TEMPERATURAS EN LA PARTE MEDIA DEL EJE NEOVOLCANICO", Depto. Geotermia (CFE), 1978.

- 11.- (9) Sergio Mercado "EVALUACION DE LOS RECURSOS GEOTERMICOS EN MEXICO, CFE, 1976.
- 12.- Mercado Sergio, "LA GEOTERMIA EN EL MUNDO Y SU DESARROLLO Y UTILIZACION EN MEXICO", Instituto Regional de la Laguna, 4-9 Junio, 1979.
- 13.- Mercado Sergio, "NUEVOS DESARROLLOS GEOTERMICOS EN MEXICO" Depto. Geotermia (IIE), San Salvador, 21-27 Octubre, 1979.
- 14.- (4) Molina Berbellier R. y Templos M.A., "HIDROGEOQUIMICA", Depto. de Geotermia (CFE), 1977.
- 15.- (6) Molina Berbellier y Templos M.A., "METODOS DE ANALISIS QUIMICOS PARA FLUIDOS GEOTERMICOS", Depto. Geotermia (CFE) Mayo, 1977.

Conferencias:

- 1.- Arturo González, "LA GEOTERMIA EN MEXICO", Oct. 1979.
- 2.- Sergio Mercado, "EXTRACCION DE SALES DE LA SALMUERA DE DESECHO DE LA PLANTA GEOTERMoelectrica DE CERRO PRIETO", Octubre, 1979.

Entrevistas:

- 1.- Ing. Sergio Mercado. Jefe del Depto. de Geotermia. Div. Fuentes de Energía IIE.
- 2.- Ing. Arturo González Salazar. Jefe del Depto. de Geotermia CFE.