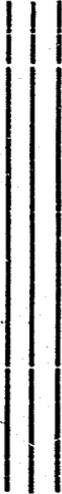


11  
2ej



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



## " LA GEOTERMIA, UNA ALTERNATIVA ENERGETICA "

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

**FAUSTINO ALONSO REYES**

DIRECTOR: M. A. JUAN JOSE DIMATTED CAMORANO



U. N. A. M.

México, D. F.

1987



## **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 está 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.

INDICE.

AGRADECIMIENTOS .....	VI
PREFACIO .....	XIV
PRIMERA PARTE: LA ENERGIA .....	1
CAP I) GENERALIDADES .....	3
I.1)    Introducción .....	3
I.2)    Tipos de Energía y su Clasificación .....	17
I.3)    Fuentes de Energía .....	27
I.4)    Evolución Histórica en el Uso de los Energéticos .....	30
CAP II) ALTERNATIVAS PARA LA PRODUCCION DE ENERGIA .....	41
II.1)    Convencionales .....	41
II.1.1)    No Renovables .....	41
a)    Hidrocarburos .....	43
b)    Combustibles Fósiles Sólidos (Carbón) ..	53
c)    Combustibles Nucleares Fisionables .....	64
II.1.2)    Renovables .....	84
d)    Recursos Geotérmicos Hidrotermales .....	85
e)    Recursos Hidráulicos .....	85
f)    Recursos de Biomasa Convencional (Madera y Carbón Vegetal) .....	94

II.2)	No Convencionales .....	104
II.2.1)	No Renovables .....	104
a)	Hidrocarburos No Convencionales .....	105
b)	Carbón No Convencional (Turba) .....	127
c)	Combustibles Nucleares Fisionables No Convencionales .....	135
II.2.2)	Renovables .....	141
d)	Recursos Geotérmicos No Convencionales ....	143
e)	Recursos de Biomasa No Convencional .....	143
f)	Recursos Solares .....	162
g)	Recursos Eólicos .....	182
h)	Recursos Geométicos .....	204
i)	Recursos Nucleares Fusionables .....	232
APENDICE A:	Breve Descripción de las Tecnologías Utilizadas en la Producción de Electricidad, a Través de - Diferentes Fuentes de Energía .....	241
REFERENCIAS (La Energía) .....		258
SEGUNDA PARTE:	LA GEOTERMIA .....	275
CAP III)	GENERALIDADES .....	277
III.1)	Definición de Geotermia .....	277
III.2)	Origen de la Energía Geotérmica Hidroter- mal .....	278
III.3)	Definición de Campo Geotérmico Hidrotermal ..	287
III.4)	Evolución Histórica en la Utilización de la Energía Geotérmica .....	290

	III.5)	Otros Sistemas Geotérmicos .....	291
		a) Energía Geotérmica de Rocas Secas y Calientes .....	292
		b) Energía Geotérmica de Zonas de Alta Presión .....	298
		c) Energía Geotérmica de Masas de Magma ..	302
		d) Energía Geotérmica Marina .....	305
	III.6)	Usos Alternos de la Energía Geotérmica ...	314
CAP IV)		LA GEOTERMIA EN EL MUNDO .....	319
	IV.1)	Antecedentes .....	319
	IV.2)	Evolución y Perspectivas .....	324
	IV.3)	Actuales Usos Alternos en el Mundo .....	330
CAP V)		LA GEOTERMIA EN MEXICO .....	340
	V.1)	Antecedentes .....	340
	V.2)	Evolución y Perspectivas .....	343
	V.3)	Importancia (Ventajas y Desventajas) .....	364
	V.4)	Actuales Usos Alternos en México .....	390
		REFERENCIAS (La Geotermia) .....	398
		TERCERA PARTE: DESARROLLO DE UN PROYECTO GEOTERMOELECTRICO ...	409
CAP VI)		Antecedentes .....	411
	VI.1)	Introducción .....	411
	VI.2)	Estudio de las Necesidades de Generación ..	413
	VI.3)	Infraestructura Disponible y Necesaria ...	415
	VI.4)	Diferentes Alternativas Para Satisfacer las Necesidades .....	417

CAP VII)	ESTIMACION DE LA MAGNITUD Y POTENCIALIDAD DEL YACIMIENTO .....	418
	VII.1) Exploración Preliminar .....	418
	VII.2) Exploración de Detalle .....	421
	VII.3) Perforación Exploratoria .....	433
CAP VIII)	PLAN BASICO DE DESARROLLO .....	440
	VIII.1) Estimación Gruesa de la Capacidad de Generación .....	440
	VIII.2) Planeación y Programación de la Perforación .....	444
	VIII.3) Determinación del Uso de los Fluidos de Desecho .....	451
CAP IX)	PERFORACION DE LOS POZOS DE PRODUCCION Y DE REINYECCION .....	452
	IX.1) Equipos y Técnicas Utilizadas en la Perforación de Pozos Geotérmicos .....	452
	IX.2) Diferencias Básicas entre la Perforación Geotérmica y la Perforación Petrolera .....	458
	IX.3) Puntos más Importantes a Considerar al Realizar la Perforación .....	464
	IX.4) Pozos de Reinyección .....	469
	IX.5) Equipo Superficial de un Pozo Típico ....	471
	IX.6) Desarrollo de un Pozo Geotérmico .....	475

CAP X)	ANALISIS DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS POZOS Y DE LOS FLUIDOS GEOTERMICOS .....	481
	X.1) Evaluación de las Características de los Pozos y sus Fluidos .....	481
	X.2) Pruebas de Materiales .....	492
CAP XI)	PLANEACION, ECONOMIA E INGENIERIA BASICA DE LA CENTRAL .....	494
	XI.1) Ingeniería Básica de la Central .....	495
	XI.2) Evaluación Económica .....	540
	XI.3) Evaluación Socioeconómica .....	549
CAP XII)	INGENIERIA DE DETALLE Y MANUFACTURA .....	552
CAP XIII)	CONSTRUCCION DE CENTRAL Y CAMPO .....	571
CAP XIV)	OPERACION Y MANTENIMIENTO .....	587
	XIV.1) Operación de Central y Campo .....	587
	XIV.2) Mantenimiento de Central y Campo .....	590
	REFERENCIAS (Desarrollo de un Proyecto Geotermoelectrico) .....	594
CAP XV)	CONCLUSIONES DEL TRABAJO .....	603
	INDICE DE FIGURAS Y TABLAS .....	607

AGRADECIMIENTOS.

Si bien todo lo expresado a lo largo de este trabajo es de mi absoluta responsabilidad, quisiera patentizar, aunque sea inadecuadamente, mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron de manera importante a su realización, y sin cuya ayuda y apoyo me hubiera sido imposible terminarlo.

En primer lugar, mi reconocimiento y gratitud al M.A. Juan J. DiMatteo Camoirano, quien como mi director de tesis me apoyó en todo momento y permitió que mi trabajo siguiera siempre las pautas que yo me iba marcando, aunque sin dejar nunca de quitarme y aconsejarme sobre el camino más conveniente a seguir para el mejor desarrollo de la tesis; y quien tuvo además la paciencia para dirigirme el trabajo durante los dos años que se llevó su elaboración.

Estoy también enormemente agradecido al Ing. Sergio Mercado Gonzalez, Investigador Nacional y del Instituto de Investigaciones Eléctricas en el área geotérmica, quien mostró un gran interés por mi trabajo, y realizó una revisión exhaustiva y a conciencia de la totalidad del mismo; adicionalmente contribuyó de manera muy importante corrigiendo la redacción y proporcionándome continuamente gran cantidad de información, dedicándome con frecuencia parte muy valiosa de su tiempo y habiéndome ofrecido su más total apoyo y confianza.

Mi reconocimiento más profundo al M.C. Mario C. Suárez A-  
rriaga, del Departamento de Evaluación de Yacimientos de la Gerencia  
de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electrici-  
dad, que fue una de las primeras personas que creyó en mi y en mi --  
trabajo, y quien revisó también la totalidad del mismo, realizando --  
siempre sus oportunas críticas, comentarios y sugerencias, y dedicán-  
dome repetidamente parte substancial de su tiempo.

Estoy asimismo muy agradecido con el Ing. Luis Cto. Gutié-  
rrez Negrín, Jefe de la Oficina de Geología de la Gerencia de Proyec-  
tos Geotermoeléctricos de la CFE, quien realizó una de las revisio-  
nes más detalladas de la totalidad del trabajo, corrigiéndome además  
el estilo y redacción, y atendiéndome en numerosas ocasiones a fin -  
de proporcionarme información y consejos sobre muy diversos tópicos,  
con lo que contribuyó de manera notable a mejorar la calidad del tra-  
bajo.

También aprecio en su valor la gran confianza que tuvo en-  
mi trabajo el Ing. Luis F. De Anda Flores, revisándome el total del-  
mismo, y anexándome simultáneamente sus valiosos comentarios y opinio-  
nes acerca de toda la obra; tomándose la molestia de recibirme nume-  
rosas veces en su casa, además de proyectarme diversas películas so-  
bre campos geotérmicos de México y el mundo. Su colaboración fue -  
vital para poder concluir lo relacionado con los inicios de la geo-  
termia en México.

En particular deseo expresar mi más profundo agradecimien-  
to al Ing. Hector Alonso Espinosa, Gerente de Proyectos Geotermoeléct-  
ricos de la CFE, quien revisó el primer escrito que realicé sobre -  
la geotermia, impulsándome a seguir con el desarrollo del trabajo y  
haciéndome también diversas sugerencias al respecto, además de haber  
me proporcionado importante información sobre la geotermia; estoy en

deuda también con él por haberme prestado toda la ayuda y apoyo que durante tanto tiempo necesité, tanto para la terminación de mi carrera, como de este trabajo, y por haberme brindado su ayuda para poder continuar con mis estudios de maestría.

Mi gratitud y simpatía al M.C. Jesús Ruiz Elizondo, Asesor de la Gerencia de Proyectos Quotermoelectricos de la CFE, que realizó una revisión muy detallada de la parte correspondiente a la geotermia, y quien me apoyó constantemente con sus sugerencias, ofreciéndome siempre sus desinteresados consejos que tan valiosos fueron para mí; así como al Dr. Jose L. Fernández Zayas, Investigador en el área solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM, quien revisó la parte correspondiente a recursos solares, dándome opiniones y comentarios muy oportunos sobre el contenido, objetivos y presentación del trabajo, y especialmente de la parte correspondiente a la energía.

Estoy igualmente muy agradecido al Ing. Juan Eibenschütz - Hartman, Subdirector General de la Comisión Federal de Electricidad, quien me dedicó siempre algunos momentos para hacerme comentarios acerca de la parte correspondiente a la energía, realizando adicionalmente una revisión muy crítica y acertada sobre los recursos nucleares fisiónables (convencionales y no convencionales) y fusiónables, lo cual fue de gran ayuda para eliminar en mí una gran cantidad de prejuicios y miedos que, por desconocimiento, tenía sobre dichos temas. Por otra parte, su ayuda resultó importante ya que supo dirigirme hacia otras personas que posteriormente también habrían de auxiliarme de manera considerable.

Doy asimismo las gracias al Ing. Jacinto Viqueira Landa, Jefe de la División de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, quien como uno de mis primeros profesores en la maestría en energía, inició y fomentó en mí el cariño por la misma y por los energéticos, revisando adicionalmente la parte correspondiente a la energía, con su consecuente cuota de anotaciones al respecto.

Quisiera también agradecer al Ing. Santos Reyes González, Investigador del Departamento de Recuperación Térmica de la División de Yacimientos del Instituto Mexicano del Petróleo, la revisión que realizó a los temas de hidrocarburos convencionales y no convencionales; así como al M.C. Marco A. Borja Díaz, Investigador en el área eólica del Departamento de Fuentes No Convencionales de la División de Fuentes de Energía del IIE, que revisó con gran espíritu crítico la parte correspondiente a recursos eólicos, además de proporcionarme una cantidad importante de documentos sobre dicho tema que resultaron de suma valía para poder concluirlo.

Quiero aquí manifestar mi mayor admiración por el M.I. José A. Maza Alvarez, Jefe de la Unidad de Ingeniería Civil, Preliminar y Geotecnia, dependiente de la Subdirección de Construcción de la CFE, que realizó la revisión del tema de recursos oceánicos, y de quien adicionalmente aprendí conceptos tan importantes, como las grandes satisfacciones que puede dar una vida dedicada a la ciencia y a la técnica; e igualmente a la M.C. Ana M. Martínez Izal, Investigadora en el área de biomasa del Departamento de Fuentes no Convencionales del IIE, que revisó los temas correspondientes a recursos de biomasa convencionales y no convencionales.

Mi agradecimiento al M.C. Jorge Ibarra Maycotte, Jefe del Departamento de Estudios Carboníferos y Nucleares de la CFE, que realizó una profunda y analítica revisión de los temas de carbón convencional y no convencional (turba), y de arenas y lutitas bituminosas; así como al personal de la Gerencia de Proyectos Hidroeléctricos de la CFE, que revisó la parte correspondiente a recursos hidráulicos.

Vaya mi reconocimiento al Ing. Victor O. Rodríguez R. De La Gala y al M.I. Jesús Ocasio Salgado, Asesores Técnicos de la Dirección General de la CFE, quienes amablemente hicieron una revisión crítica y conceptual de la parte dedicada a la energía.

Debo agradecer al Dr. Jesús Rivera Rodríguez, ex-Jefe de la División de Ingeniería Petrolera del Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, y actual Coordinador del Proyecto Geotérmico de la Universidad de Stanford, las revisiones que realizó a diversos tópicos del trabajo como los de origen y características de la geotermia, yacimientos geotérmicos, y perforación de pozos geotérmicos entre otros.

Muchas gracias también al Ing. Armando Aceves Flores, Jefe del Proyecto Tejamaniles del Departamento de Ingeniería y Diseño de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE, quien realizó una revisión a fondo de todo lo relacionado con la ingeniería básica y de detalle del proyecto, anón de proporcionarme información en varias ocasiones.

Gracias asimismo al Ing. Felipe Arenas García, Jefe de la Oficina de Ingeniería de Perforación de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE, que revisó el capítulo concerniente a la Perforación de Pozos. A renglón seguido he de expresar mi agradecimiento al Ing. Michel E. Giacopello Vizcaino, del Departamento de Factibilidad de Proyectos de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE, que revisó las partes correspondientes a la evaluación económica y socioeconómica del proyecto.

Mi agradecimiento más sincero a los Dres. Maurizio Girelli y Ferruccio Jarach del ELC Electroconsul de Italia, quienes durante una breve estancia en México, tuvieron la atención de hacerme una rápida revisión de todo el trabajo, ofreciéndome sus puntos de vista, - críticas y sugerencias, mismas que fueron sumamente útiles para complementario.

Gracias al Ing. Adolfo Rodríguez Herrera, Jefe del Departamento de Construcción de Plantas de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE, quien revisó la parte correspondiente a la -- Construcción de Central y Campo, prestándome asimismo información muy valiosa al respecto.

Recibí también una ayuda muy importante del Ing. Alfredo - Mañón Mercado, Coordinador Ejecutivo de la Planta Geotérmica de Cerro Prieto en Mexicali, quien en diversas ocasiones me proporcionó información escrita y oral de suma importancia para el trabajo. Tanto él como el Fis. José L. Quijano León, Jefe de la Oficina de Geofísica - de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE, y el Ing. - Alfonso Araçón Aguilar, Jefe de la Oficina de Reinyección de la misma Gerencia, fueron valiosos auxiliares, atendiéndome frecuentemente y - proporcionándome información sobre temas poco conocidos para mí.

Me encuentro especialmente en deuda con el Ing. Luis Silva Costilla, Secretario del Interior del SUTERM, que me ofreció su apoyo y ayuda desinteresada y quien fué el punto de enlace con muchas de -- las personas -sin cuyo auxilio no me hubiera sido posible conocerlas- que posteriormente habrían de realizar revisiones a diversos temas de mi trabajo; por otro lado, su participación fué vital para poder lograr la impresión de mi tesis.

Muchas otras gentes han contribuido para la realización de este trabajo, más no es posible nombrarlas a todas, quisiera sin embargo expresar mi agradecimiento a todas aquellas que, aunque esporádica y brevemente, tuvieron siempre la cortesía de atenderme, participando también de manera importante en el desarrollo de la tesis, especialmente a los ingenieros Arturo González Salazar, Bernardo Domínguez Aguirre, Carlos Miranda Motezuma, Alberto Plauchú Lima, Antonio Pazo Montiel, Alfonso Galindo Valencia y el Dr. Gerardo Hiriart LeBert, de la Gerencia de Proyectos Geotermoelectrícos de la CFE; así como al Dr. Vinicio Sement Cabrero de la CFE, al oceanólogo Gabriel Delgado Carbellido de EPN-GRAY, al Ing. Jose L. Hernández Galán del IIE y al Ing. Alejandro D. Guiza Ezkauriatza. Todos ellos contribuyeron proporcionándome información en muy diversas ocasiones.

Mi gratitud muy especialmente a Patricia Fernández Velázquez quien realizó, siempre con una gran calidad, una parte considerable de las tablas y figuras que aparecen a lo largo del trabajo; e igualmente a la Sra. Marcela Del Palacio de Puente, que mecanografió una gran parte del trabajo y quien me ofreció en todo momento su más completa ayuda.

Vaya también mi agradecimiento al Ing. Francisco Vela Campananes del IIE, quien me proporcionó siempre, de forma oportuna y con una excelente calidad, toda la información que durante el desarrollo de este trabajo le fui solicitando sobre muy diversas materias, por lo que su ayuda me resultó indispensable; asimismo al Lic. José R. Brito Guzmán, Auxiliar Administrativo de la Gerencia de Proyectos Geotermoelectrícos de la CFE, que me proporcionó apoyo audiovisual para la presentación de mi examen profesional.

Agradezco a Kenia Ibarra Gaytán el ánimo, apoyo, paciencia y confianza que mostró por mí y por mi trabajo a lo largo de todo este tiempo; además por haber mecanografiado la segunda parte de la tesis correspondiente a la geotermia.

Es difícil en tan corto espacio manifestar hasta que punto estimo la ayuda que recibí de diversas instituciones, mi gratitud -- muy especial a la Universidad Nacional Autónoma de México, y particularmente a la Facultad de Ingeniería, por haberme dado la oportunidad de estudiar y simplemente por permitirme tener el orgullo y -- privilegio de ser universitario, voya para ellas mi más profundo cariño y admiración; fue también muy importante la contribución que hizo la Comisión Federal de Electricidad, quien me dio todas las facilidades para la realización del trabajo, y especialmente la de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, que me otorgó su más incondicional apoyo, sin el cual mi trabajo nunca hubiera podido cumplir -- sus objetivos. Agradezco la atención y calidad de servicio del Instituto de Investigaciones Eléctricas, que de manera desinteresada y eficaz me brindó toda la ayuda que necesitó, la cual resultó insustituible para poder terminar adecuadamente mi trabajo. Gracias también a todo el personal de la Oficina Auxiliar de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, por su ayuda y confianza.

P R E F A C I O.

El origen de este trabajo no fue casual, ya que nació debido a mi interés muy particular en las fuentes de energía y específicamente en la geotermia, lo cual se vio reforzado por mi experiencia de más de 7 años dentro de esta última área.

Durante su desarrollo traté de seguir un proceso que fuera de lo general a lo particular, de ahí que dediqué la primera parte a hablar sobre la importancia de la energía en el mundo, y de todas y cada una de las diferentes alternativas de que se dispone para su producción; posteriormente en la segunda parte me avoqué al estudio a fondo de una de dichas alternativas, la geotermia; finalmente durante la tercera parte particularizé aun más, y traté de mostrar el proceso más eficiente y racional para aprovechar los recursos geotérmicos hidrotermales, a través del desarrollo de un proyecto geotermoelectrico.

Si bien resulta conveniente que el lector interesado en el conocimiento amplio de la geotermia, y de su contexto energético, lea la totalidad de la tesis, no es requisito indispensable que se haga así, ya que pueden leerse por separado cada una de las tres partes, dependiendo de los intereses y gustos particulares.

Decidí anexar al final de cada parte las referencias consultadas en cada una, a fin de mejorar la presentación del trabajo, y sobre todo, para facilitar la consulta de la información relacionada con cada una de las partes.

Un profesor ..... nunca logra  
saber donde termina su influencia.  
- Henry Adams -

PRIMERA PARTE : LA ENERGIA.

El que lee mucho y viaja mucho,  
va mucho y sabe mucho.

- Cervantes -

CAP I) GENERALIDADES.

I.1) Introducción.

Desde el principio de la historia de la raza humana, los mayores avances en las civilizaciones han estado acompañados por un incremento en el consumo de energía. Esto se debe a que la evolución propia del hombre y por ende de sus adelantos tecnológicos, requiere de cantidades cada vez mayores de la misma.

Por ello, la búsqueda para utilizar la materia que le rodea de una manera más eficiente y económica para satisfacer sus necesidades de subsistencia y bienestar (por medio de su utilización directa o de alguna transformación), se ha hecho más intensa.

Como consecuencia clara de la evolución tecnológica de la humanidad, la dependencia de los energéticos se ha hecho cada vez mayor. Por otro lado, la demanda de estos crece de una manera exponencial, lo cual contribuye a agravar aún más el problema de su obtención y aprovechamiento\*\*.

\*\* MEADOWS, H. Donella; MEADOWS, L. Dennis.  
Los Límites del Crecimiento.  
Informe del Club de Roma, F.C.E.  
México, 1975.

Es por ello que es indispensable volver lo ojos hacia - nuevas fuentes de energía, que deberán ser capaces de satisfacer las necesidades crecientes de la humanidad, tratando que sean renovables a la vez que lo menos contaminante posible. Este último es un aspecto al que se le dió poca importancia en el pasado, pero que ya no puede dejar de tenerse en cuenta en el futuro.

Según principios geológicos comúnmente aceptados, los recursos energéticos de menor calidad ( o sea los que tienen una menor intensidad energética ) que los que se utilizan en la actualidad, son a su vez los que están más ampliamente distribuidos en el mundo.

Por ello su explotación podría reducir tensiones y problemas políticos y económicos asociados con la actual concentración desigual de las reservas de hidrocarburos, carbón y uranio en algunas zonas geográficas.

Pero el problema de la energía va aun más allá, ya que no basta con que las fuentes energéticas sean renovables o infinitas, pues es necesario utilizarlas de una manera más eficiente y racional a fin de no contribuir a agravar aun más el problema.

Por otra parte, el estudio de la energía no puede realizarse de una manera aislada, ya que está estrechamente relacionado con muchos otros factores como lo son los económicos, políticos, sociales, ecológicos, etc.

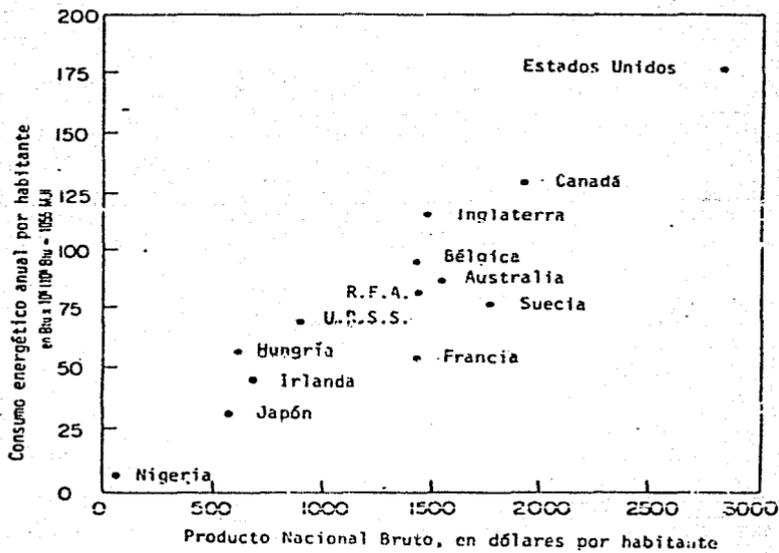
En la actualidad el consumo de energía aparece directamente relacionado con el nivel de vida de la población y el grado de industrialización de un país. De hecho, la información histórica de numerosos países indica que existe una relación entre la utilización de energía y el desarrollo de la economía. Esto se ilustra en la figura I.1, que muestra la relación entre el consumo de energía por habitante y el nivel de vida, representado por el producto nacional bruto por habitante, y la figura I.2 que muestra la variación del producto nacional bruto con respecto al consumo de energía, para los Estados Unidos.

En realidad, los países que han podido disponer de reservas abundantes de energía, son los que han obtenido altos promedios de crecimiento industrial, con su correspondiente incremento en el producto nacional bruto. Sin embargo en muchas ocasiones, la disponibilidad de energía a bajo costo ha propiciado una utilización ineficiente de la misma, y en algunas ocasiones, desastrosos efectos ecológicos.

La relación entre el consumo de energía de un país, y su actividad económica, se puede cuantificar para un año determinado, por medio de la siguiente expresión:

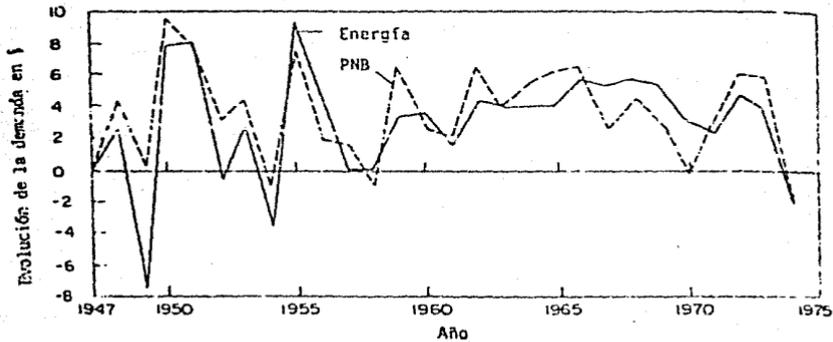
$$E(n) = C_e Y(n)$$

FIGURA I.1) RELACION ENTRE EI, CONSUMO ENERGETICO Y EL PNB.



Fuente: Scientific American, Vol. 224, No. 3 (1971).

FIGURA I.2) EVOLUCION DE LA RELACION ENTRE CRECIMIENTO DE LA DEMANDA ENERGETICA Y EL PNB EN ESTADOS UNIDOS.



Fuente: Bureau of Mines. US Department of the Interior.

donde:

$E(n)$  = Consumo de energía primaria en el año  $n$ , expresado en unidades físicas.

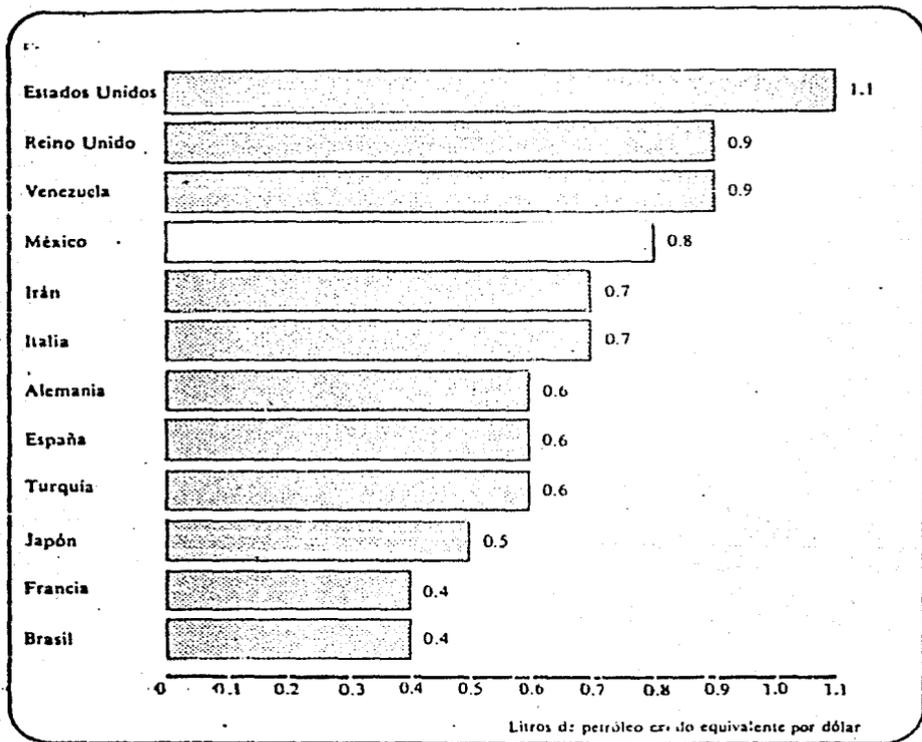
$Y(n)$  = Actividad económica en el año  $n$ , expresada por el producto nacional bruto (PNA) o el producto interno bruto (PIB).

$C_e$  = Constante de proporcionalidad denominada coeficiente de energía o de intensidad energética.

El coeficiente de energía  $C_e$ , expresa la cantidad de energía requerida para producir una unidad de producto nacional bruto, y es por lo tanto, una medida global de la eficacia con que una sociedad utiliza la energía.

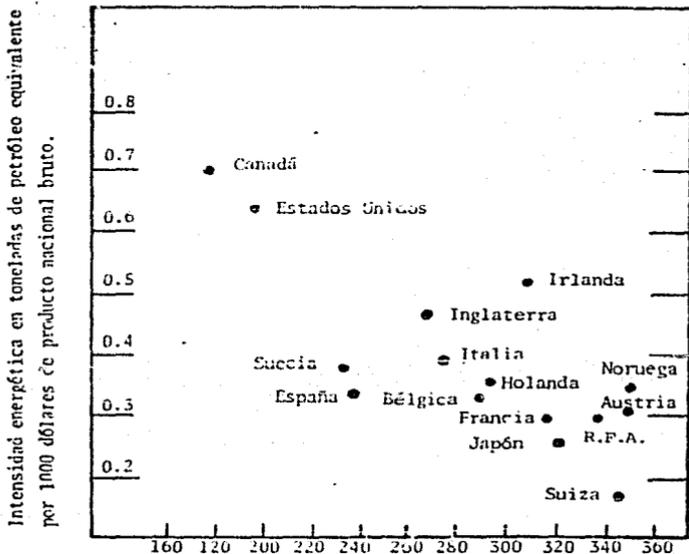
Esto se puede ver mejor en la figura I.3 que muestra el consumo de energía primaria por unidad de producto interno bruto, y se puede apreciar claramente, que países como Brasil con economías semejantes a la de México, son mucho más eficientes que este en el uso de la energía. Aun más, en la figura I.4 se muestra la variación en la intensidad del uso de la energía en varios países con respecto a los precios de la misma, y nuevamente se corrobora que los países con precios bajos de energía son más ineficientes (lo que se refleja en un mayor coeficiente de intensidad energética), que los que mantienen los precios altos.

FIGURA I.3) CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA POR UNIDAD DE PRODUCTO INTERNO BRUTO EN PAISES SELECCIONADOS, 1978.



Fuente: Programa de Energía, México 1981.

Fig. I-4) Relación entre los precios de la energía y la intensidad energética en varios países 1978.



Fuente: Fondo Monetario Internacional, citado en *El Economista*, 26 de Diciembre de 1981.

Por otra parte, el valor del coeficiente de energía se ve afectado por dos grupos de factores que son: \*\*

- Factores Estructurales: Se deben a la estructura de la economía nacional, es decir a la naturaleza de las actividades económicas que engendran el producto nacional bruto. En ellos tiene mucha importancia el tipo de industria con que cuente un país, ya que como se sabe existen algunas (como la del aluminio) altamente consumidoras de energía, mientras que otras, como la refinación en la industria del petróleo, requieren menor energía en comparación.
  
- Factores Tecnológicos: Conciernen a la forma en que es utilizada la energía en cada industria o sector de la economía. Ellos se deben a la eficiencia con que se realizan los procesos en un país, lo cual a su vez está relacionado con el tipo de tecnología utilizada, que a su vez depende en gran manera de los precios de la energía.

\*\* MARTIN, J.M.  
Crecimiento económico y Consumo de Energía.  
Revista Investigación Económica, No. 149,  
Septiembre de 1979. Facultad de Economía, U.N.A.M.

Es importante señalar que los precios altos de la energía no solo propician un uso más eficiente de la misma, sino que también llevan directa o indirectamente al desarrollo de tecnologías más eficientes, y de nuevas fuentes de energía.

Para valorar de una mejor manera la actual importancia de los energéticos, basta con saber que en 1984 se estimaba que en los siguientes 6 años el mundo requeriría de un volumen de energéticos igual al consumido en los últimos 100 años.\*\* Lo cual corroboraría que el crecimiento de la demanda mundial de energía, se comporta de una manera exponencial.

Aun más, las estadísticas señalan que en 1982, un poco más del 80% de las necesidades mundiales totales de energía, fueron cubiertas básicamente con el petróleo, el gas natural y el carbón, cubriéndose el 20% restante con otro tipo de fuentes como la nuclear, la geotermia, la hidroelectricidad, e incluso la madera y el carbón.

En México, la situación es aun más crítica, ya que la dependencia de hidrocarburos es prácticamente total, alcanzando la desorbitada cifra del 91% !!! Cubriéndose el resto con carbón, la hidroelectricidad y la geotermia, debe aclararse que esta dependencia de hidrocarburos puede ser un poco menor ya que no se está tomando en cuenta la contribución de la madera y el carbón vegetal a la oferta nacional, por no existir datos ni investigaciones precisas al respecto, sin embargo se estima que debe ser del orden del 10 o 11%. El problema se agrava más ya que independientemente de la casi nula diversificación de las fuentes de energía, no existe prácticamente investigación sobre otras fuentes.

\*\* ALONSO, Espinosa Héctor.  
Geotermia, Una Fuente Alternativa de Energía para la Producción de Electricidad.  
Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad. México, Agosto de 1984.

Resumiendo para el caso de México, se puede decir que la situación por el momento no es crítica, pero esto se debe únicamente a la suerte de contar con reservas bastantes importantes de hidrocarburos, sin embargo estas tienden a disminuir y muy probablemente en un futuro no muy lejano a agotarse. De ahí la necesidad IMPERIOSA de desarrollar nuevas fuentes de energía.

Pero no basta con el desarrollo de nuevas fuentes para solucionar el problema de la energía en el país. Es necesario -- además que se deje de mantener la política de precios bajos en los energéticos, ya que como se ha demostrado a lo largo de la historia y en todo el mundo, esto conduce a un uso ineficiente de los mismos lo cual se traduce a su vez en una alta intensidad energética, es decir se consume mucha energía para producir un determinado producto, siendo que podría producirse con cantidades menores de energía.

En el caso de México, la situación es todavía peor, ya -- que las estadísticas mundiales muestran que conforme los países se han ido desarrollando, su coeficiente de intensidad energética ha ido disminuyendo, mientras que en México, a pesar de el claro desarrollo que se ha logrado, el coeficiente de intensidad no solo no ha disminuido, sino lo que es peor, ha aumentado.

Por lo tanto, es claro que se necesita tomar medidas urgentes en el país, si no se desea pasar una crisis energética en 10 o 15 años, esto es, para el año 2000 aproximadamente. Sin querer ser alarmistas, puede verse que estos datos concuerdan con los obtenidos por diversas instituciones mundiales, como el ya mencionado Club de Roma, en el sentido de que para los primeros años del siglo XXI (de no cambiarse drásticamente la situación actual de las cosas), se presentará una crisis a nivel mundial que se dará no solo en el ámbito energético, sino en el de alimentos, recursos, contaminación, etc.

Sin embargo, hablar de una "crisis energética" en términos de una escasez de recursos a nivel mundial es poco realista, ya que los recursos energéticos explotables a costos 2 a 5 veces mayores -- que los actuales son considerables.\*\* La llamada crisis energética es más un asunto de disponibilidad no uniforme de dichos recursos, - de precios altos o inestables, de la situación de la energía en los mercados mundiales y de factores socio-políticos en general.

Por otro lado, es importante considerar también el problema que pueden representar las fuentes de energía, en materia de contaminación. En la primera mitad del siglo XV, dichas fuentes se explotaron tomando como consideración primaria lo económico, esto es, lo más importante era obtener bajos costos. En la actualidad, esta explotación debe concernir a las tres "E" (Energía, Economía y Ecología), por lo que los ingenieros modernos deberán tratar de desarrollar sistemas que produzcan grandes cantidades de energía a los costos más bajos y con efectos mínimos sobre el medio ambiente.

El balance apropiado de estas tres "E" es un reto tecnológico bastante grande..... Ojalá que el mundo sea capaz de resolverlo.

\*\* ALONSO, Concheiro Antonio; RODRIGUEZ, Viqueira Luis. Diagnóstico y Pronóstico sobre Energía Solar, Biomasa y Energía Eólica. Tomo 1, Proyecto 2106, CONACYT-Instituto de Ingeniería, UNAM, Noviembre de 1982.

Es obvio que para poder seguir aumentando el nivel de vida de la mayoría de la población mundial, el consumo de energía se debe expandir de manera substancial.

De hecho, entre 1960 y 1976 el consumo mundial de energía se duplicó, pasando de  $3.4 \times 10^9$  Toneladas Equivalentes de Petróleo (TEP) = 154 Exajoules,\*\* a  $6.7 \times 10^9$  TEP = 304 Exajoules,\*\*\* lo que implica una tasa media de crecimiento anual del 4.4%.

Los países industrializados siguen siendo los grandes consumidores de energía, aunque su participación en el consumo mundial se redujo ligeramente del 78% en 1925 al 75% en 1976. Por lo que hace al consumo de energía per cápita las diferencias entre los países industrializados y el resto del mundo son dramáticas; la energía consumida por habitante en los países industrializados es entre 15 y 20 veces mayor que la consumida por los países en desarrollo y 3 veces mayor que la correspondiente a los países de economía centralizada.

A mediados de la década de los 60 y principios de los 70, se preveía llegar a un consumo de 1000 exajoules para el año 2000, pero después de las crisis energéticas de 1973 y 1976, y por ende de la revisión mundial de los programas energéticos, ahora se pone en tela de juicio el que efectivamente se llegue a esa cantidad.

Puede verse que aún en el caso de no llegarse al consumo de 1000 exajoules en el año 2000, el consumo de energía de la humanidad seguirá creciendo irremediablemente, por lo que es indispensable desarrollar nuevas fuentes que puedan permitir satisfacerlo en el futuro.

\*\* 1 Exajoule =  $10^{18}$  Joules.

\*\*\* 1 TEP =  $45.4 \times 10^9$  Joules =  $10,079 \times 10^6$  Kcal.

En la tabla I.1 aparecen las reservas mundiales estimadas de energía, es importante observar que algunos de los recursos aparecen cuantificados únicamente para los Estados Unidos, por lo que en realidad estos recursos son mayores, sobre todo si se piensa en los correspondientes a la energía solar, que son de una magnitud muy importante, además de todos aquellos que faltan de cuantificarse.

Tabla I.1- RESERVAS ESTIMADAS DE ENERGÍA DEL MUNDO

FUENTE	CANTIDAD	TIPO
Potencial total disponible de las mareas (a,b)	$6.7 \times 10^{10}$ W	Mecánica
Potencial total disponible del agua (a,b)	$300.0 \times 10^{10}$ W	Mecánica
Potencial de la energía eólica en E.U.A. (a,b)	$970.0 \times 10^{10}$ W	Mecánica
Energía geotérmica recuperable	$0.4 \times 10^{21}$ J	Térmica
Reservas de esquistos bituminosos (c,d)	$1.2 \times 10^{21}$ J	Química
Reservas de arenas bituminosas (c,d)	$1.8 \times 10^{21}$ J	Química
Reservas de gas natural (c)	$9.5 \times 10^{21}$ J	Química
Reservas de petróleo (c)	$11.7 \times 10^{21}$ J	Química
Reservas de uranio-235 (d,e)	$13.7 \times 10^{21}$ J	Nuclear
Potencial de energía solar en E.U.A. (a)	$187,000.0 \times 10^{10}$ W	Electromagnética
Reservas de torio ( $^{232}\text{Th}$ ) (f)	$71.7 \times 10^{21}$ J	Nuclear
Reservas de carbón y lignito (c)	$200.0 \times 10^{21}$ J	Química
Reservas de uranio-238 ( $^{238}\text{U}$ ) (f)	$1,809.0 \times 10^{21}$ J	Nuclear
Deuterio ( $^2\text{H}$ ) - Tritio ( $^3\text{H}$ ) (g)	$6,100.0 \times 10^{21}$ J	Nuclear
Deuterio ( $^2\text{H}$ ) - Deuterio ( $^2\text{H}$ ) (g)	$6,000,000.0 \times 10^{21}$ J	Nuclear

a) Estas reservas son recursos renovables y constituyen actualmente una fuente de potencia.

b) Estas reservas pueden convertirse directamente a energía mecánica, mientras que muchas de las otras reservas deben convertirse normalmente en energía térmica.

c) Estas reservas están clasificadas como combustibles fósiles.

d) Estas reservas dependen sobremanera de los precios de la energía convencional.

e) Este es el único isótopo natural fisurable.

f) La utilización de estas reservas depende del desarrollo de los reactores de cría y de la fisión consecuentemente del isótopo que aparece en entre paréntesis.

g) La utilización de estas reservas depende del desarrollo de los reactores de fusión.

Fuente: Principles of Energy Conversion (1979).

## I.2) Tipos de Energía y su Clasificación.

Antes de hablar de los tipos de energía y de su clasificación, es importante tratar de dar una definición de lo que es energía, lo cual no resulta nada fácil, ya que el concepto que de la misma se ha tenido a lo largo de la historia ha sido muy variable.

En términos generales y sin profundizar mucho en el tema, se puede decir que la energía es la capacidad de las partículas o sistemas de partículas, que conforman un sistema, para efectuar un trabajo.

Hay que diferenciar el concepto de energía del calificativo energético, ya que por este último se entiende a toda materia que tiene la propiedad potencial de transformarse en energía útil, ya sea por sus características físicas o químicas.\*\*

Por otra parte combustibles son los materiales que se utilizan en el proceso químico de la combustión, junto con el aire u otro comburente, para generar energía térmica o calorífica.\*\*\*

El poder calorífico puede definirse como la cantidad de energía por unidad de masa que puede obtenerse de un energético, y suele expresarse por lo general en kilocalorías por kilogramo o kilojoules por kilogramo.\*\*\*\*

\*\* VIQUEIRA, Landa Jacinto.  
Apuntes de la Materia Energía y Desarrollo Económico.  
Maestría en Ingeniería Energética, DEPEFI, UNAM. 1985

\*\*\* Idem. al anterior

\*\*\*\* Idem. al anterior

Es importante hacer notar que existe una diferencia entre la energía total y la energía útil, ya que si bien la energía total se conserva, no puede decirse lo mismo de su parte útil, la cual -- disminuye irremisiblemente en cada transformación.

Por ejemplo, si con la energía química del carbón se produce energía calorífica y con esta energía mecánica en una máquina de vapor, la última constituirá solamente una parte de la energía primitiva del carbón; la energía que falta subsiste disipada en forma de calor que ya no es susceptible de utilizarse. aunque a final de cuentas la suma total de la energía es la misma que la original.

Esta pérdida en forma de calor es imposible de eliminarse aunque si es factible que mejorando la eficiencia de conversión pueda disminuirse, ello debido a la segunda Ley de la Termodinámica -- que dice que en toda transformación existirá siempre una pérdida en forma de calor, resultando imposible lograr una eficiencia del 100%; esto es, no se puede transformar toda la energía térmica en energía mecánica.

Existen 2 tipos generales de energía (transitoria y almacenada). La energía transitoria es energía en movimiento, y como tal se puede mover a través de los límites de los sistemas.

La energía almacenada, como su nombre lo implica, es una forma de energía que existe como masas en un campo de fuerza, agua almacenada en lo alto de un despeñadero, etc. Estas formas almacenadas pueden convertirse usualmente de una manera sencilla en alguna forma de energía transitoria.

No existe un método o sistema de clasificación de energía generalmente aceptado, pero en este trabajo se utilizará la siguiente clasificación, que consiste en dividir las diferentes formas de energía en 6 grupos o clasificaciones, estos son:

- Energía mecánica.
- Energía eléctrica.
- Energía electromagnética.
- Energía química.
- Energía nuclear.
- Energía térmica.

Por otra parte, las principales formas de energía se caracterizan por dos factores que son la calidad y la cantidad. Que respectivamente serían la altura del salto de agua y el caudal en la energía hidráulica; la tensión y la intensidad en la energía eléctrica; la diferencia de temperaturas y la capacidad calorífica en las máquinas térmicas, etc.

Energía mecánica: Se define en termodinámica como la energía que puede ser utilizada para levantar un peso.

La forma transitoria, de esta forma de energía es a lo que se le llama trabajo. La energía mecánica puede ser almacenada como energía potencial o estática, o como energía cinética. La energía potencial es aquella que posee una cantidad dada de materia, como consecuencia de su posición en un campo de fuerza. Esto incluye la energía de un campo gravitatorio, la energía asociada con un fluido en compresión, la energía asociada con la posición de substancias ferromagnéticas en un campo magnético, y la energía asociada a un estiramiento de algún cuerpo elástico, como en los resortes y barras de torsión. La energía mecánica es una de las formas más usuales de energía y puede convertirse fácil y eficientemente en otras formas de energía. En el Sistema Internacional de Unidades la unidad de energía es el Joule (N . m), y la unidad de potencia es el watt (  $\frac{\text{joule}}{\text{seg}}$  )

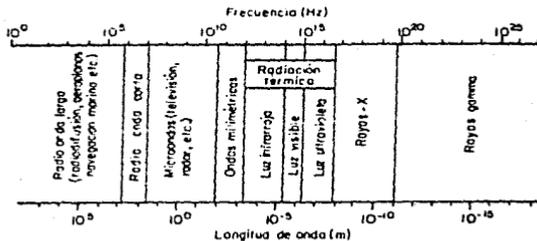
Energía eléctrica: Es la clase de energía asociada con el flujo o acumulación de electrones. La forma transitoria de la energía eléctrica, es el flujo de electrones, usualmente a través de algún conductor de determinado material. La energía eléctrica puede ser almacenada como energía de un campo electrostático, o como energía de un campo inductivo. La energía de un campo electrostático es la energía asociada con el campo eléctrico producido por la acumulación de carga (electrones) en las placas de un capacitor. La energía de un campo inductivo, que a veces es llamada energía de un campo electromagnético, es la energía asociada con el campo magnético--establecido por el flujo de electrones a través de una bobina inductora. La energía eléctrica, al igual que la energía mecánica, es una forma muy usual de energía, debido a su facilidad y eficiencia para convertirse en otras formas de energía. Normalmente se le mide en unidades de potencia - tiempo, watts/hora o kilowatts/hora.

Energía electromagnética: Es la forma de energía que está relacionada con las radiaciones electromagnéticas. La radiación electromagnética es una forma de energía pura y por lo tanto no existe ninguna masa asociada a ella. Esta energía existe solo como energía transicional viajando a la velocidad de la luz, C. La velocidad de una onda C es igual al producto de la frecuencia V, en ciclos por segundo o Hertz, y la longitud de onda  $\lambda$ , en metros, de la radiación. La energía E de esas ondas es directamente proporcional a la frecuencia V de la radiación y está dada por la siguiente relación:

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

Donde E es la energía expresada en Joules, h es la constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34}$  Joules x seg.), V es la frecuencia y  $\lambda$  la longitud de onda. Las ondas electromagnéticas más energéticas tienen longitud de onda corta y altas frecuencias. Existen varias clases diferentes de radiación electromagnética dependiendo de la longitud de onda (energía) de la fuente de radiación. La radiación Gamma o de rayos Gamma es la forma de energía electromagnética más energética, esto es, más poderosa, y la mayor parte de ella emana de los núcleos atómicos. Siguiendo en orden descendente en lo que a potencialidad energética se refiere se tiene a -- los rayos X, que son producidos como resultado de la excitación de los -- electrones orbitales. La radiación termal es radiación electromagnética que se produce como resultado de las vibraciones atómicas. Esta banda es muy ancha, ya que incluye las altas temperaturas de la radiación ultravioleta, la muy estrecha banda de la luz visible y la banda de bajas temperaturas o radiación infrarroja. La siguiente banda es la de miliondas y posteriormente la de microondas, muy utilizada en una infinidad de usos tan diversos que van desde el radar a los hornos de microondas. La última forma de radiación electromagnética es la de ondas de radio, la cual incluye las ondas cortas y las largas. En la figura I.5 se muestra el espectro de radiaciones electromagnéticas.

FIGURA I.5) ESPECTRO DE RADIACIONES ELECTROMAGNETICAS.



fuentes: Principles of Energy Conversion. (1979).

Este tipo de radiación de energía se mide usualmente en unidades muy pequeñas como los electronvolts (eV), o los megaelectronvolts (MeV).

Esta unidad de energía es también muy usada en la evaluación de la energía nuclear.

Energía Química: Es la energía que es liberada como resultado de la interacción de los electrones, en la cual 2 o más átomos y/o moléculas se combinan para producir un compuesto más estable químicamente. La energía química existe únicamente en la forma de energía almacenada. Si la energía se libera en forma de una reacción química, se le llama reacción exotérmica, sin embargo en algunas reacciones químicas, la energía es absorbida y a estas reacciones se les llama endotérmicas. Para el ser humano la más importante fuente de energía combustible es la reacción química exotérmica llamada combustión. La reacción de combustión involucra la oxidación de combustibles fósiles. Este tipo de energía por lo general se mide en calorías, kilocalorías o BTU's (British Thermal Units)

Energía Nuclear: Esta es otra forma de energía que existe únicamente en forma de energía almacenada, la cual es liberada como resultado de la interacción de partículas con o dentro de los núcleos atómicos. Su liberación se produce como resultado de la producción de partículas que asumen una configuración más estable. Existen tres tipos generales de reacciones nucleares, las cuales incluyen el decaimiento radiactivo, la fisión y la fusión. El proceso de decaimiento radiactivo es aquel en el cual solamente un núcleo inestable, (un radioisótopo) decae aleatoriamente a una configuración más estable con la liberación de partículas de energía. La reacción de fisión que es el principal proceso en un reactor nuclear, ocurre cuando una masa de núcleos pesados absorbe un neutrón y el núcleo compuesto excitado que resulta de ello se divide en 2 ó más núcleos con su consecuente liberación de energía.

En la reacción de fusión, dos núcleos de masas ligeras se combinan para producir una configuración más estable, con una consecuente liberación de energía. La reacción de aniquilación es comúnmente enunciada como una reacción nuclear, pero realmente es una reacción separada que no está necesariamente asociada a una reacción nuclear. Esta reacción es la única reacción de conversión de energía, en la cual toda la masa reactante es convertida en energía, esto es, es la única en que las partículas atómicas como tales son completamente destruidas. En la reacción de aniquilación, la materia y la antimateria combinadas son convertidas en energía electromagnética.

Sin embargo, el único proceso de este tipo conocido en la naturaleza involucra partículas subatómicas y por lo tanto no es una reacción importante. Este tipo de energía se mide generalmente en megaelectronvolts (MeV) por reacción.

**Energía Térmica:** Esta forma de energía está asociada con las vibraciones atómicas y moleculares. La energía térmica es una forma de energía básica, en la cual puede ser completamente transformada cualquiera de las otras fuentes de energía, sin embargo la conversión de la energía térmica en otras formas de energía está severamente limitada por la segunda ley de la termodinámica, que dice que es imposible transformar toda la energía térmica en energía mecánica.

La forma transitoria de la energía térmica es el calor, y, por otra parte, se puede almacenar en casi cualquier medio como calor sensible o calor latente. El almacenamiento de calor sensible se ve acompañado de un incremento en la temperatura, mientras que el almacenamiento del calor latente es un proceso isotérmico asociado con un cambio de fase. El calor es comúnmente medido en calorías, kilocalorías o BTU (British Thermal Units).

En la figura I.6 aparece una matriz de conversión de energía, en la cual se muestran los diversos procesos, reacciones y sistemas usados en la conversión de una forma de energía en otra.

17 FIGURA 1.6) MATRIZ DE CONVERSION DE ENERGIA

DE		Energía primaria										Energía eléctrica				
E	Energía secundaria	Energía solar					Energía geotérmica					Energía eólica				
		Directa	Energía solar térmica	Energía solar fotovoltaica	Energía solar térmica (sistema de agua caliente)	Energía solar térmica (sistema de calefacción)	Energía geotérmica (sistema de agua caliente)	Energía geotérmica (sistema de calefacción)	Energía eólica	Energía eólica						
1	Energía solar directa	1	0.75	0.15	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
2	Energía solar térmica	0.75	1	0.2	0.15	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
3	Energía solar fotovoltaica	0.15	0.2	1	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
4	Energía solar térmica (sistema de agua caliente)	0.1	0.15	0.1	1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
5	Energía solar térmica (sistema de calefacción)	0.05	0.05	0.05	0.05	1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
6	Energía geotérmica (sistema de agua caliente)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
7	Energía geotérmica (sistema de calefacción)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
8	Energía geotérmica (sistema de calefacción)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
9	Energía eólica	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
10	Energía eólica	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

- 1) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
- 1) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
  - 2) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
  - 3) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
  - 4) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
  - 5) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
  - 6) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
  - 7) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
  - 8) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
  - 9) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
  - 10) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).

- 1) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
- 2) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
- 3) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
- 4) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
- 5) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
- 6) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
- 7) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
- 8) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
- 9) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).
- 10) Fuente: Franco, L. de. (1974). Conversiones (1974).



### I.3) Fuentes de Energía.

Las fuentes de energía se pueden agrupar dentro de dos categorías generales: \*\*

- Celeste o de Ingreso
- Terrestre o Principal

La energía celeste es aquella que obtiene la Tierra del espacio exterior, e incluye todas las posibles fuentes de provisión de energía a la Tierra provenientes del espacio, estas incluyen la energía electromagnética, gravitacional, y la energía de las estrellas, - planetas y de la Luna, así como la potencial energía de los meteoritos entrando en la atmósfera terrestre.

Actualmente las únicas fuentes utilizables de energía celeste son la energía electromagnética proveniente del Sol, llamada - energía solar directa, y la energía gravitacional de la Luna terrestre la cual produce flujos de mareas.

La utilización de las fuentes de energía celeste es muy -- atractiva debido a que son fuentes continuas e inagotables, y porque prácticamente están libres de toda contaminación, lo cual en la actualidad resulta ser una consideración de mucha importancia. \*\*\*

\*\* Existen varias formas de clasificar las fuentes de energía, sin embargo en este trabajo se utilizará la dada por Archie W. Culp - en el libro Principles of Energy Conversion.

\*\*\* Aunque su factibilidad técnica-económica se encuentra todavía muy distante.

La energía solar directa, genera también indirectamente algunos recursos inagotables de energía. El calor solar, combinado con la rotación de la tierra, produce algunas corrientes muy grandes de convección en forma de viento en la atmósfera y de corrientes oceánicas en los mares. La absorción de energía solar genera también gradientes térmicos relativamente grandes en los océanos que tienen la potencialidad de producir potencia. En adición, la evaporación de la superficie del agua genera nubes, las cuales cuando se condensan en lluvia a grandes altitudes, proveen la fuente para las plantas hidroeléctricas. El viento genera también grandes corrientes oceánicas, que tienen el potencial para generar energía.

La energía principal o terrestre es aquella que ya existe en o dentro de la tierra, e incluye la energía geotérmica y la atómica, entendiendo el término de energía atómica a la energía liberada como resultado de cualquier tipo de reacción entre átomos (incluyendo en ello a la energía química y la nuclear).

Otra forma muy importante de clasificar las fuentes de energía, atendiendo a si se necesitan o no transformaciones para su uso y que es muy utilizada en los balances de energía es la siguiente:

- Energía Primaria.
- Energía Secundaria.

Las fuentes de energía primaria son aquellas que contienen potencialmente energía y que se encuentran en su estado natural.

En esta categoría quedan incluidos los combustibles fósiles, como el carbón mineral, el petróleo crudo, el gas natural; las substancias fisiónables como el uranio; la energía hidráulica, la energía geotérmica, la energía solar y probablemente en el futuro la energía de la fusión nuclear.

Las fuentes de energía secundaria son aquellas que provienen de la transformación de las fuentes de energía primaria, la cual tiene por objeto facilitar el transporte y la utilización de la energía. Entre las principales energías secundarias se tienen los productos obtenidos de la refinación del petróleo crudo, como la gasolina, el diesel y el combustóleo y los productos derivados del gas natural como el gas LP para usos domésticos. Otra energía secundaria vital en la actualidad es la electricidad, la cual cada vez toma una mayor importancia. En el futuro, el hidrógeno podría también constituir también una energía secundaria importante.

Finalmente la energía útil es la que realmente aprovecha el usuario.

Como se sabe, en cada transformación existe una pérdida de energía, de ahí que resulte importante definir la eficiencia de un proceso como la relación entre su salida y entrada de energía, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$E = \frac{\text{Salidas de energía}}{\text{Entradas de energía}}$$

Por otra parte, las transformaciones de energía primaria en energía secundaria y posteriormente en energía útil se realizan con eficiencias que en general son bastante bajas y que dependen tanto de las leyes físicas de los fenómenos involucrados como de las tecnologías utilizadas, de ahí la vital importancia de mejorar las eficiencias de transformación.

#### I.4) Evolución histórica en el uso de los energéticos.

Desde los albores de la historia, la raza humana ha ido utilizando más y más energía con el descubrimiento de nuevas fuentes de energía y el desarrollo de nuevos y mejores métodos de conversión.

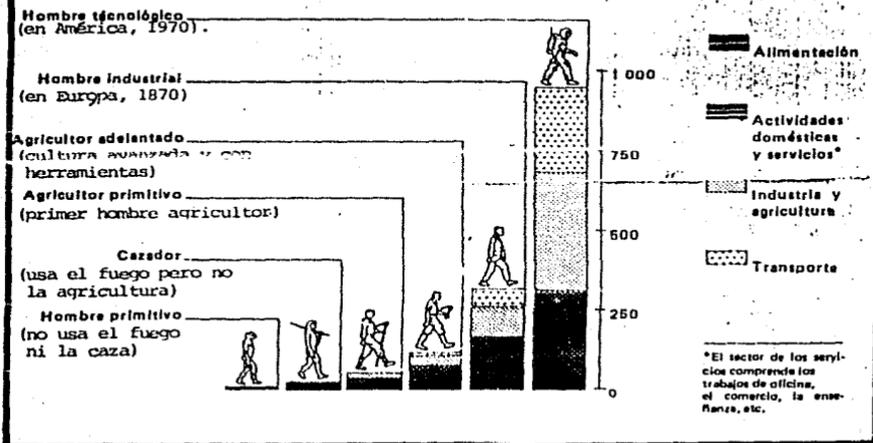
El consumo de energía por habitante, que había aumentado -- lentamente durante siglos, crece rápidamente en las sociedades industrializadas, especialmente debido a la utilización de la energía concentrada en los combustibles fósiles y a la substitución de la fuerza muscular del hombre y de los animales por máquinas (máquinas de vapor, motores de combustión interna, generadores y motores eléctricos, etc.)

Esto se muestra esquemáticamente en la figura I.7 que exhibe la cantidad de energía consumida por el hombre a lo largo de la historia.

La primera fuente de energía fue la energía muscular (en principio la propia y posteriormente la del trabajo animal), en épocas posteriores tempranas de su evolución, el hombre aprendió a producir energía a través de la combustión de carbohidratos (de las plantas y la madera).

Alrededor de 3000 A.C. el hombre se dió cuenta que podía utilizar la energía del viento para mover sus embarcaciones en la navegación a vela, para después durante la Edad Media aplicar esa misma energía para mover molinos de viento, ampliamente utilizados en la agricultura.

FIGURA I.7) CONSUMO INDIVIDUAL EXPRESADO EN MILES DE KILOJULIOS POR DÍA



Fuente: Realidades en torno a la Energía. INEN-OIEA., Julio, 1984.

La energía del agua fué utilizada por primera vez alrededor del nacimiento de Cristo, sin embargo no es sino hasta el siglo XVIII cuando se utiliza en larga escala la energía térmica como fuente para la producción de energía mecánica.

La revolución industrial, iniciada a mediados del mismo siglo, y el invento de la máquina de vapor, dan lugar al uso creciente del carbón, que constituye el energético preponderante durante el siglo XIX y la primera parte del siglo XX. El uso de los hidrocarburos como energéticos (primero el petróleo y después también el gas natural) se inicia a principios del presente siglo y gradualmente van desplazando al carbón hasta convertirse en la fuente de energía primaria más importante.

En las figuras 1.8 y 1.9 se muestra respectivamente la evolución de la producción mundial de carbón y de petróleo crudo.

La producción mundial de carbón creció a una tasa media anual del orden del 4% durante el período comprendido entre 1860 y la Primera Guerra Mundial, posteriormente se estancó en el período entre las dos guerras mundiales y volvió a crecer a una tasa anual de alrededor del 3%.

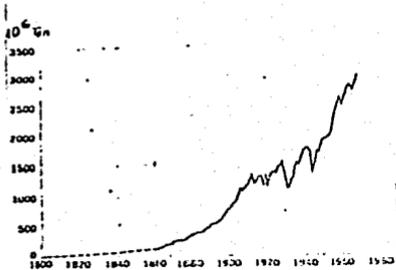


Fig. 2.8) Producción mundial de carbón.

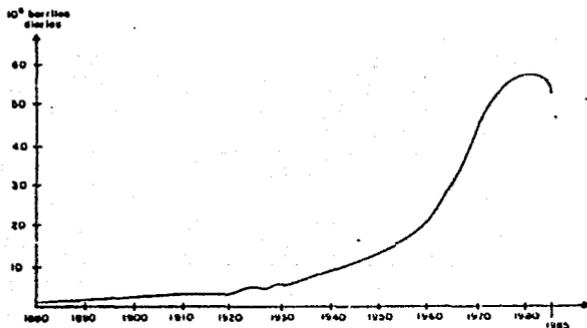


Fig. 2.9) Producción mundial de petróleo crudo.

Basado en datos de la Oficina de Energía y Desarrollo Económico, (OECD, UNDP, 1965).

La producción mundial de petróleo crudo creció entre 1880 y 1970 a una tasa anual del 7%, lo que significa que la producción se duplicó cada diez años.

La experiencia histórica demuestra que la sustitución de unos energéticos por otros se ha realizado de manera lenta y paulatina y ha estado condicionada por factores económicos y tecnológicos.

C. Marchetti<sup>44</sup> mostró que los diferentes recursos energéticos penetran en el mercado de la energía y aumentan y después disminuyen su participación en forma logística, que se ajusta al siguiente modelo matemático:

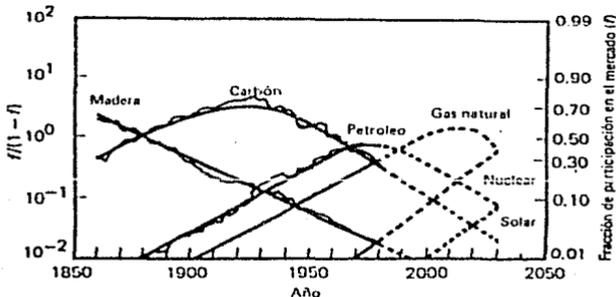
$$F_{tt} - \left( -\frac{F}{1-F} \right) = kF + c$$

Donde F es la fracción del mercado total capturado por el nuevo energético, t es el tiempo y k y c son constantes, siendo k la tasa de crecimiento y c la participación inicial en el mercado del energético bajo consideración.

<sup>44</sup> Citado por VIQUEIRA, Ianda Jacinto. Apuntes de la Materia Energía y Desarrollo Económico. Maestría en Ingeniería Energética. DEFI, UNAM. 1985.

La figura I.10 muestra la aplicación de este modelo al proceso de sustitución de los principales energéticos primarios en el mundo a partir de la segunda mitad del siglo pasado. Dicha figura está tomada de un estudio elaborado por el grupo a cargo del programa de Sistemas de Energía del Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA), de Insenburg, Austria, publicado en mayo de 1981.

FIGURA I.10) ESQUEMA DE LA HISTORIA DE LA SUSTITUCIÓN DE LA ENERGÍA PRIMARIA EN EL MUNDO.



Sustitución de la energía primaria global: ejemplo en el que se sigue su historia de 1860 a 1875, para proyectar la participación en el mercado hasta el año 2030;  $f$  es la participación fraccional de cada tecnología en el mercado. (Del informe del IIASA "Energy In a Finite World".)

Las líneas onduladas representan los datos históricos y las líneas uniformes los resultados de la aplicación del modelo, la notable concordancia entre ambas confirma la validez del modelo matemático.

Puede verse en dicha figura que la participación de la madera, que hacia 1860 representaba casi el 70% de la oferta energética mundial, se ha ido reduciendo hasta representar menos del 5% en 1980.\*\*

La participación del carbón aumentó hasta alcanzar un máximo hacia 1920 y luego declinó, al crecer el uso del petróleo y -- del gas natural, que para 1980 cubrían conjuntamente alrededor del 65% del mercado mundial de energía.

Se observa que el papel de la energía nuclear empieza a ser importante a partir de la década de los 70, debido a su crecimiento con una pendiente acelerada, aunque esto ha decaído un poco a últimas fechas, a causa principalmente de los problemas que las -- centrales nucleares han tenido en los últimos años.

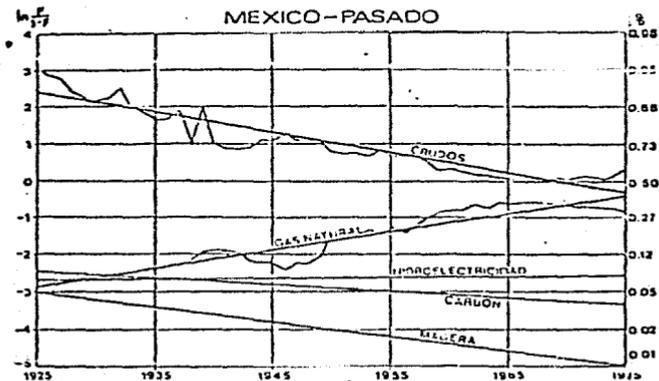
Por otra parte, en el estudio aparece la energía solar-- a principios del siglo XXI, con una participación pequeña pero que se prevé deberá ser cada vez más importante conforme transcurra el tiempo.

E. López Vancell\*\*\* aplicó el modelo al caso de México, (ver la figura I.11), y puede apreciarse como se ajusta el modelo (lí--neas gruesas y rectas) a los datos históricos (líneas finas y que--bradas), durante el período comprendido entre 1925 y 1975.

\*\* Esta cifra es muy variable según la fuente de que proviene, aun que la mayor parte de los especialistas dan como un valor más--aproximado la cifra de entre 11 y 12%. (Consultar recursos de--biomasa convencional).

\*\*\* Citado por VIQUEIRA, Linda Jacinto.  
Apuntes de la Materia Energía y Desarrollo Económico.  
Maestría en Ingeniería Energética. DEPTI, UNAM. 1985.

FIGURA I.11) EVOLUCION DE LA PARTICIPACION RELATIVA DE LOS DISTINTOS ENERGETICOS EN LA OFERTA DE ENERGIA PRIMARIA AL MERCADO NACIONAL DE MEXICO.



Fuente: Apuntes de Energía y Desarrollo Económico. DEPEI, UNAM. 1985.

En 1925 el petróleo era ya en México el energético dominante, representando cerca del 90% de la oferta de energía primaria al mercado nacional. Su importancia relativa ha ido disminuyendo a medida que ha aumentado la del gas natural, de manera que en 1975 los hidrocarburos en su conjunto (petróleo crudo y gas natural), contribuyeron con un porcentaje del mismo orden, pero a un mercado energético de magnitud mucho mayor. Situación que prevalece hasta la fecha.

La importancia relativa del carbón ha ido declinando en el período considerado y lo mismo ha ocurrido, pero en un grado mucho mayor, con la biomasa, la cual a pesar de todo, y según estudios recientes hechos por el IIE y la UNAM, representa todavía cerca del 11% del consumo nacional de energía, aunque en las cifras oficiales este valor aparece como menor, lo cual se debe más que nada a los pocos estudios que se han hecho sobre el tema.\*\* Por su parte, el carbón -- representa en la actualidad el 2% del consumo nacional.

Es importante señalar que va sea que se considere como cierto el valor de 11% dado por el IIE y la UNAM, o se tome el valor oficial dado por la SEMIP, aún así, la biomasa representa una contribución mayor a la oferta energética primaria nacional, que el carbón y la geotermia juntos.

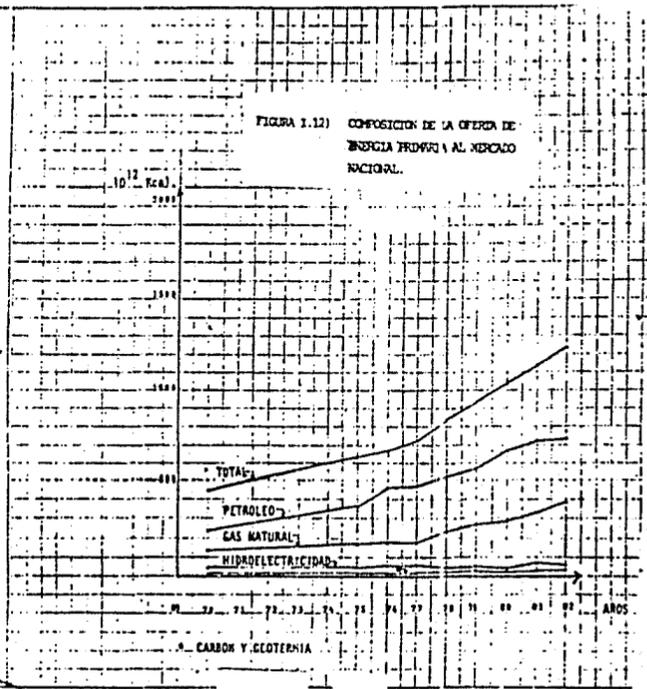
\*\* El Balance Nacional de Energía 1982-1984, realizado por la SEMIP señala que la leña representó en 1984 un 3.4% de la producción de energía primaria, mientras que el bagazo de caña representó el 1%.

Es claro que estos no representan la totalidad de la biomasa, por lo que el valor real de la misma deberá ser mayor, independientemente de que es muy probable que la contribución de la leña sea mayor que la aquí estipulada, debido a que es muy difícil poder determinar de manera adecuada su valor exacto.

Por lo que respecta a la participación de la hidroelectricidad en la oferta energética, esta se ha mantenido a un nivel del 5% lo que implica un aumento importante en valor absoluto.

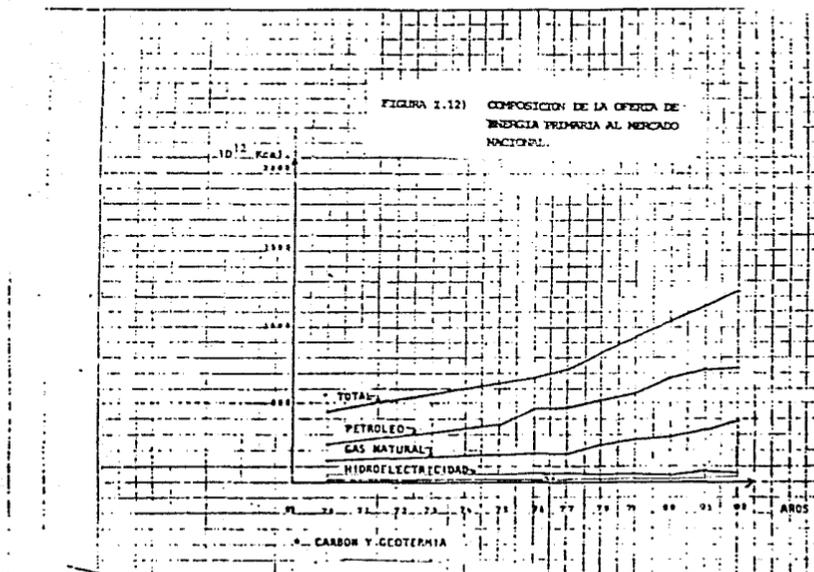
En la figura I.12 se muestra la composición de la oferta de energía primaria al mercado nacional.

FIGURA 1.12) COMPOSICION DE LA OFERTA DE ENERGIA PRIMARIA AL MERCADO NACIONAL.



FUENTE: Fuentes de Energía y Desarrollo económico; D.E.P.F.I. D.N.A.E. (1985)

FIGURA 1.12) COMPOSICION DE LA OFERTA DE ENERGIA PRIMARIA AL MERCADO NACIONAL.



FUENTE: Anales de Energía y Desarrollo económico; D.E.P.F.I.  
 U.N.A.M. (1985)

La lectura es una conversación  
con los hombres más ilustrados  
del pasado.

- Descartes -

CAP II) ALTERNATIVAS PARA LA PRODUCCION DE ENERGIA.

II.1) Convencionales.

Por fuentes convencionales se entenderán aquellas en las que se ha desarrollado su tecnología completamente; cuya explotación resulta competitiva desde el punto de vista económico; y que tienen una utilización comercial en el mercado de por lo menos 25 años.

Estas fuentes a su vez se han dividido en función de su temporalidad en No Renovables y Renovables.

II.1.1) No Renovables.

Las economías actuales se basan en recursos energéticos no renovables, cuyas reservas se irán agotando independientemente de posibles nuevos descubrimientos de yacimientos de hidrocarburos, depósitos de carbón, o uranio, que se estima no serán espectaculares.

Solo los países industrializados tienen un consumo más diversificado y balanceado de las diferentes fuentes de energía.

Aún así, a nivel mundial, los recursos no renovables cubren cerca del 85% de la demanda total de energía, satisfaciéndose el 15% restante con otras fuentes convencionales renovables como la energía hidráulica y la geotermia con un 5 - 6% en conjunto, y con un recurso muy poco cuantificado pero que los expertos calculan debe representar entre el 9-10% del consumo total de energía y que es la leña.

A pesar de los esfuerzos realizados en muchas partes del mundo en el desarrollo de otras fuentes no convencionales, como la energía solar, la eólica, la biomasa, la turba, los esquistos bituminosos, etc., estos no cubren todavía ni el 1% de la demanda total de energía.

En el presente trabajo se definen como recursos convencionales no renovables los siguientes: \*\*

- a) Hidrocarburos.
- b) Combustibles fósiles sólidos.
- c) Combustibles nucleares fisionables. \*\*\*

\*\* Dado que no existe una definición generalizada de recursos convencionales y no convencionales, el autor después de un minucioso estudio propone la que se manejará en este texto.

\*\*\* En realidad en el aprovechamiento de la energía nuclear, esta no se obtiene por medio de la combustión del uranio, sino por la fisión del núcleo del átomo.

a) Hidrocarburos.

Dentro de este grupo se incluyen dos energéticos vitales en la actualidad, como son:

- i) Petróleo.
- ii) Gas Natural.

i) Petróleo.

Aquí se considera lo que se denominará "Petróleo Convencional", o sea el crudo que puede obtenerse utilizando las tecnologías actualmente disponibles y a un costo que resulte rentable.

Específicamente este "Petróleo Convencional" se refiere al obtenido de los yacimientos terrestres y en el mar con tirantes de agua menores a 200 metros.

El petróleo pasó de cerca del 15% del consumo mundial de energía en 1925 a casi el 50% en 1980.

La importancia actual de este recurso se debe a sus costos y a su relativamente fácil explotación, además de a su versatilidad de usos, ya que puede emplearse como energía primaria para la producción de electricidad, o como energía secundaria a través de ciertas transformaciones, en forma de diesel, gasolinas, queroseno, etc.

En lo que respecta a su utilización para la producción de electricidad, su contribución es menor, pero no así su importancia, ya que las plantas termoeléctricas\*\* representan aproximadamente el 40% de la producción mundial de electricidad.\*\*\*

En el apéndice (A) se muestran muy brevemente los principales tipos de centrales para la producción de electricidad, que pueden utilizar petróleo o alguno de sus derivados.

\*\* Se entiende por plantas termoeléctricas las que utilizan hidrocarburos o sus derivados para la producción de energía térmica, y de ésta a energía eléctrica. Definiéndose como convencionales aquellas diseñadas para trabajar con combustible o con gas natural.

Existen además las unidades diesel que operan con una mezcla de diesel y combustible; mientras que las unidades de turbogas y las de ciclo combinado pueden utilizar indistintamente gas o diesel dependiendo de las condiciones que prevalezcan en el mercado.

\*\*\* Este porcentaje puede variar mucho según la época o país, ya que depende del grado de desarrollo de los países, de las condiciones del mercado y de condiciones específicas como la cantidad de lluvia en un año determinado (lo cual influirá en una mayor o menor producción de electricidad a través de plantas hidroeléctricas), o la aceptación político-social de los programas nucleares.

La preferencia en uso del petróleo sobre el carbón tiene sus razones lógicas, ya que el primero presenta las siguientes ventajas sobre el segundo.

- Extracción más fácil.
- Transporte más barato.
- Es un combustible más limpio.
- Su valor calorífico es 1.7 veces mayor que el del carbón.\*\*

Por lo que respecta al petróleo obtenido de las plataformas marinas, conviene señalar que representa el 20% de la producción total mundial. Y aunque su explotación solo resulta competitiva - cuando se extrae con tirantes de agua entre 200 y 300 m, actualmente existe la tecnología necesaria para perforar más de 1,000 m bajo el agua, por lo que conforme los hidrocarburos vayan escaseando cada vez más, la explotación con tirantes de agua mayores será progresivamente más competitiva.

\*\* Cosmos. Gran Atlas Salvat.  
Los Recursos Naturales, Tomo IV, pag. 65.  
Editorial Salvat, España 1984.

Antes de hablar de las reservas mundiales conviene definir lo que se entiende por reservas y recursos petroleros recuperables.

**Reservas Probadas:** Es el volumen original de hidrocarburos "in situ", que ha sido medido cuidadosamente.

**Reservas Probadas Recuperables:** Son la fracción de las reservas probadas que pueden recuperarse bajo las condiciones tecnológicas y económicas actuales.

**Recursos Adicionales:** Cubren todos los recursos adicionales a las reservas probadas, que son por lo menos, de un interés económico previsible. Las estimaciones de los recursos adicionales, si bien no reflejan una certeza de la totalidad de las cantidades reportadas, si muestran un nivel de confiabilidad razonable.

En la tabla I.3, aparecen las reservas mundiales de petróleo crudo, en 1996.

Por otra parte, de acuerdo con los especialistas de la XI Conferencia Mundial de Energía, los recursos recuperables totales de "petróleo convencional"<sup>\*\*</sup>, suponiendo que la tasa promedio de recuperación, que actualmente es del 25% del petróleo contenido en el yacimiento, pase al 40% hacia fin de siglo, están comprendidas entre 240 y 360 GT ( 1 Gigatonelada =  $10^9$  ton ), proponiéndose como un valor razonable la cantidad de 354 GT. Hasta fines de 1978, el 15% de esa cantidad ya había sido recuperada, las reservas probadas representaban el 25% y los recursos adicionales el 60%.

<sup>\*\*</sup> Más adelante se tratará el tema del "petróleo no convencional".

TABLA I.3) RESERVAS PROBADAS DE PETROLEO CRUDO EN EL MUNDO.  
(Diciembre de 1986) [10<sup>9</sup> barriles]

1	Arabia Saudita	166.57
2	Kuwait	91.91
3	Unión Soviética	59.0
4	México	54.65
5	Irán	48.80
6	Irak	47.10
7	Abu Dhabi	31.0
8	Venezuela	25.0
9	Estados Unidos	24.56
10	Libia	21.3
11	China	18.4
12	Nigeria	16.0
13	Noruega	10.50
14	Reino Unido	9.0
15	Argelia	8.80
16	Indonesia	8.30
17	Canadá	6.85
18	Egipto	3.60
19	Katar	3.15
20	Malasia	2.82
	Otros países	40.13
	Total Mundial	697.44

Fuente: Oil and Gas Journal. Diciembre de 1986.

Existen grandes diferencias entre los países industrializados, los países de economía centralizada o socialistas y los países en vías de desarrollo, en lo que a producción y consumo de energía se refiere.

La mitad del petróleo que se produce a nivel mundial proviene de los países en desarrollo y una tercera parte adicional de los países industrializados, produciéndose el resto en los demás países.

La mejor hipótesis formulada en lo concerniente a los límites del suministro mundial de petróleo, sugiere que probablemente habrá una capacidad técnica de producción que alcanzará un máximo de alrededor de 4 Gigatoneladas/año hacia 1990, para declinar después lentamente a 3.5 Gigatoneladas/año hacia el año 2020.\*\*

Para el caso de México, en la tabla 1.3 se puede apreciar - que ocupa el cuarto lugar del mundo por sus reservas de crudo, con el 7.8% del total de las mismas, las cuales se encuentran distribuidas en cerca de un 75% en la zona sur del país, y un 22% adicional en el paleo canal de Chicontepec.

En el informe de labores de PEMEX de 1982, se incluye información adicional a las reservas probadas, estimando unas reservas potenciales que incluyen las reservas probadas y las probables de 250 000 millones de barriles.

\*\* ALONSO, Concheiro Antonio; y RODRIGUEZ, Viqueira Luis. Diagnóstico y pronóstico sobre Energía Solar, Biomasa y Energía Eólica. Tomo I, Proyecto 2106, CONACYT-Instituto de Ingeniería, --- U.N.A.M. Noviembre de 1982.

11) Gas Natural.

El gas natural pasó del 3% del consumo mundial de energía en 1925 al aproximadamente 16% en 1980.

De este total, los países industrializados producen casi las dos terceras partes, repartiéndose el resto entre los países en vías de desarrollo y los de economía centralizada. Esta producción no concuerda con las reservas mundiales, las cuales corresponden en un 85% (dividido en partes casi iguales) a los países socialistas -básicamente a la URSS- y los países en desarrollo.

En la tabla 1.4 aparecen las reservas mundiales de Gas Natural a diciembre de 1986.

Los especialistas calculan los recursos recuperables totales de gas natural entre  $200$  y  $300 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , proponiéndose como un valor razonable la cantidad de  $293 \times 10^{12} \text{ m}^3$ .

La Unión Soviética posee las mayores reservas mundiales de gas, las cuales representan aproximadamente la tercera parte de la totalidad de las mismas.

TABLA 1.4) RESERVAS PROBADAS DE GAS NATURAL EN EL MUNDO.  
 (Diciembre de 1986) [10<sup>12</sup> ft. cub.]

1	Unión Soviética	1,550.0
2	Irán	450.0
3	Estados Unidos	185.4
4	Katar	152.0
5	Arabia Saudita	123.99
6	Argelia	106.0
7	Noruega	103.18
8	Canadá	99.6
9	Abu Dhabi	90.0
10	México	76.5
11	Países Bajos	70.4
12	Venezuela	59.0
13	Indonesia	49.44
14	Nigeria	47.0
15	Kuwait	35.0
16	Reino Unido	33.4
17	China	30.0
18	Irak	28.0
19	Argentina	23.0
20	Libia	21.18
	Otros países	292.89
	Total Mundial	3,625.98

Fuente: Oil and Gas Journal. Diciembre de 1986.

Se estima que la producción anual de gas natural alcanzará un valor máximo de 157 EJ (EJ = Exajoules =  $10^{18}$  joules), hacia el 2000 y declinará a unos 120 EJ en el año 2020. Para esta fecha se habrá utilizado el 50% de los recursos totales de gas natural.

El uso del gas natural es bastante más reciente que el del petróleo, y la razón principal del tardío desarrollo de este valioso energético reside en la relativa dificultad de su transporte y almacenamiento, aunque a últimas fechas los problemas técnicos ya se han resuelto.

Durante los últimos 20 años la utilización de gas natural ha tenido una expansión enorme, y sin duda no ha alcanzado todavía su máximo desarrollo. La relación entre reservas probadas y producción es de cerca de 50:1, considerablemente más favorable que en el caso del petróleo.

Sin embargo, y a pesar de su incuestionable valía y de que se trata de un recurso no renovable, los países petroleros de Oriente Medio, que cuentan con alrededor de la cuarta parte de las reservas mundiales de gas natural, queman en la atmósfera el 67% del gas natural que producen asociado al petróleo. Actualmente México quema el 11% del gas natural asociado, cifra muy alta todavía, máxime si se piensa que este se podría exportar a precios internacionales, con la consecuente entrada de divisas al país.

El 97% del gas producido en el mundo se suministra por tierra mediante gasoducto, debido a que es más costoso transportarlo por cualquier otro medio. Además su transporte es siempre más costoso que el del petróleo crudo. A futuro probablemente se transportará metanol (obtenido del gas natural), en buques cisternas normales, lo cual parece ser será más económico.

En el apéndice A, aparece muy brevemente el funcionamiento y esquema básico de las centrales termoeléctricas, las unidades turbinas y las centrales de ciclo combinado, todas ellas susceptibles de utilizar gas natural, aunque no sea siempre este el combustible que utilizan.

Para el caso de México, puede verse en la tabla 1.4 que -- ocupa el décimo lugar por sus reservas de gas natural, con el 2.11% del total de las mismas. Además se encuentran mejor distribuidas -- que las de petróleo, encontrándose el 48% en la zona de Campeche, -- el 20% en la zona de Chiapas-Tabasco, el 17% en el paleocanal del -- Chicontepec y el 15% restante en las otras zonas del país. En el -- informe de PEMEX antes citado se incluyen los recursos adicionales -- de gas y líquidos de gas, estimados en  $1873 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

b) Combustibles Fósiles Sólidos\*\*.

Bajo este nombre genérico se encuentran incluidos los siguientes recursos:

- Antracita
- Carbón bituminoso
- Carbón sub-bituminoso
- Lignito

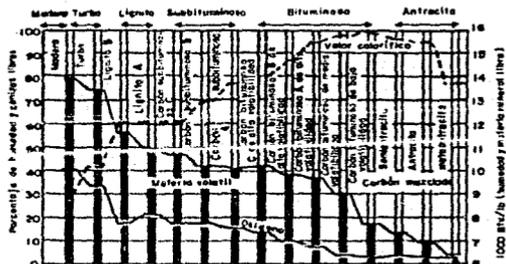
A todos ellos se les considera como "Carbón Convencional", en la sección II.2.1.b se hablará sobre el "Carbón No Convencional".

En la figura I.13 se muestra la variación de la composición y propiedades del carbón, y los distintos nombres que va tomando de acuerdo a su evolución.

Por otra parte, en el apéndice A se exhibe el esquema básico de funcionamiento de una planta carboceléctrica.

\*\* Se excluyen las lutitas bituminosas y los bitúmenes que se han incluido en la parte correspondiente a hidrocarburos no convencionales.

FIGURA I.13) VARIACION DE LAS PROPIEDADES Y COMPOSICION DEL CARBON.



Fuente: Principles of Energy Conversion. (1979).

La importancia del carbón convencional a nivel mundial ha ido disminuyendo, pasando de cerca del 80% del total de la producción de energía en 1925, a cerca del 17% en 1980,\*\* aunque debido a las tendencias actuales de diversificación de energéticos, su importancia deberá volver a crecer en los próximos años.

En la tabla 1.5 se muestran las reservas probadas mundiales de carbón; en la tabla 1.6 los recursos adicionales del mismo; y en la tabla 1.7 las reservas recuperables.\*\*\* Todas ellas tomadas del estudio sobre recursos energéticos presentado en la XI Conferencia Mundial de Energía en 1980. En la figura 1.14 aparecen las reservas probadas mundiales desdobladas por países.

\*\* ALONSO, Concheiro Antonio; RODRIGUEZ, Viqueira Luis. Diagnóstico y pronóstico sobre Energía Solar, Biomasa y Energía Eólica. Tomo I, proyecto 2106, CONACYT-Instituto de Ingeniería, UNAM. Noviembre de 1982.

\*\*\* Todas estas reservas incluyen tanto al carbón coquizable (especialmente útil en la industria del acero), como al no coquizable (adecuado para la producción de energía).

TABLA 1.5) RESERVAS PÉTRÓLEAS MUNDIALES DE CARBÓN (10<sup>9</sup> ton).

	Gt	Gtce	%
Carbón bituminoso y antracita (a)	775	775	73.0
Carbón sub-bituminoso(a)	222	173	16.3
Lignito(a)	323	113	10.7
	1320	1061	100.0

DONDE: Gt= Gigatoneladas; Gtce= Gigatoneladas de carbón equivalente.

- (a) Las reservas de los distintos tipos de carbón se convierten a -- toneladas equivalentes de carbón (TEC ó TCE) de acuerdo con los factores de conversión utilizados en las estadísticas de las Naciones Unidas, y que son los siguientes:
- Antracita y carbón bituminoso (1)
  - Carbón sub-bituminoso (0.78)
  - Lignito (0.35)

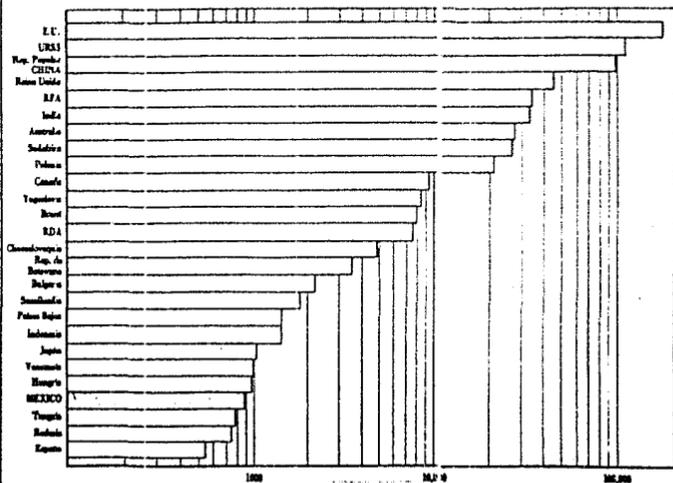
TABLA 1.6) RECURSOS MUNDIALES ADICIONALES. (  $10^9$  ton ).

	Gt	(M ce)	%
Carbón bituminoso y antracita	6161	6161	61.6
Carbón sub-bituminoso	3825	2991	29.9
Lignito	2160	848	8.5
	12146	10 000	100.0

TABLA 1.7) RESERVAS MUNDIALES RECUPERABLES. (  $10^9$  ton ).

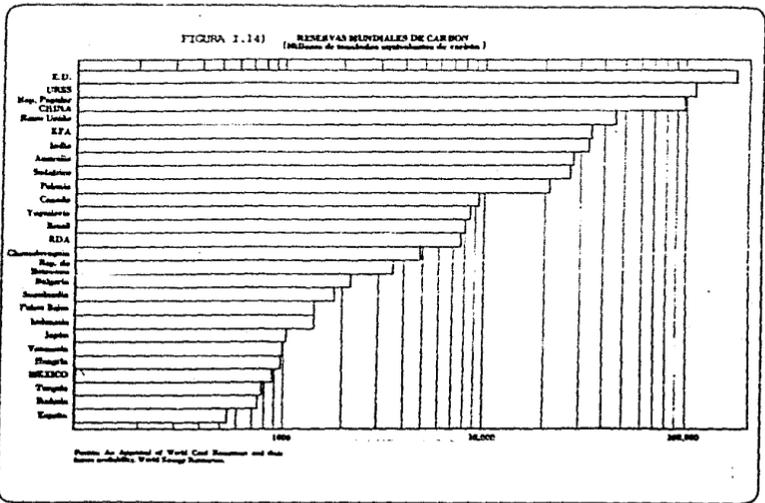
	Gt	(M ce)	%
Carbón bituminoso y antracita	488	488	71.0
Carbón sub-bituminoso	143	111	16.2
Lignito	251	88	12.8
	882	687	100.0

FIGURA 1.14) RESERVAS MUNDIALES DE CARBÓN  
(Millones de toneladas equivalentes de carbón)



From An Appraisal of World Coal Reserves and the  
More Probable World Energy Resources.

FIGURA 1.14) RESERVAS MUNDIALES DE CARBÓN  
(Millones de toneladas equivalentes de carbón)



Source: An Appraisal of World Coal Resources and their Sustainable World Energy Scenario.

Para evaluar las reservas recuperables se consideraron los siguientes límites: Para el carbón, una profundidad máxima de 1,500 m y un espesor mínimo del manto de carbón de 0.60 m. Para el lignito, una profundidad máxima de 600 m y un espesor mínimo del manto de 2 m.

Por lo que se refiere a la cantidad de carbón que puede recuperarse de un yacimiento, el estudio consideró un porcentaje de recuperación del 50% para las minas subterráneas explotadas por el método de las cámaras y pilastres; considerando que para las minas subterráneas explotadas por el método de frente largo, el carbón susceptible de recuperarse será bastante mayor.

Se considera como cifra razonable de reservas totales recuperables mundiales de carbón convencional, la cantidad de  $11,000 \times 10^9$  ton.

Los países de economía centralizada son los mayores productores de carbón convencional (en todas sus variedades), con más de la mitad de la producción mundial, cantidad que continúa creciendo; correspondiéndoles a los países desarrollados poco más de la tercera parte; mientras que los países en desarrollo solo son productores marginales del mismo.

De la XI Conferencia Mundial de Energía realizada en 1980 se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El mundo posee recursos muy abundantes de carbón, siendo el contenido energético de las reservas de los mismos mayor que el de los hidrocarburos, considerándose además la posibilidad de que existan más recursos del mismo en regiones poco exploradas, particularmente en el Hemisferio Sur.
- El carbón puede contribuir de manera muy importante en suministro futuro de energía, reduciendo a la vez el riesgo de escasez de energéticos primarios.
- El aumento de la producción y de la utilización del carbón requiere que se resuelvan varios problemas relacionados con la protección del medio ambiente.
- El principal problema a corto plazo consiste en que la producción y comercialización del carbón no se han desarrollado suficientemente porque existen todavía en el mercado otras fuentes de energía más baratas y fáciles de manejar.

Otro factor que se cree deberá contribuir significativamente al aumento en el consumo mundial de carbón, es el perfeccionamiento

to que se ha ido logrando en lo referente a la combustión fluidificada<sup>\*\*</sup>, ya que resulta mucho más eficiente y limpia que el proceso común de conversión del carbón.

Para el caso de México puede verse en la figura I.14 que -- ocupa el vigésimo tercer lugar del mundo por sus reservas de carbón, las cuales corresponden aproximadamente al 0.05% del total de las -- mismas. Aunque esta cifra es insignificante a nivel mundial, no lo es a nivel de México, ya que si se utilizara en su totalidad este re curso, serían muchos millones de barriles de petróleo lo que se p - drían ahorrar. Las reservas probadas de carbón de México se esti - man en  $701 \times 10^6$  ton.<sup>\*\*\*</sup> considerándose además unos recursos adicionales de carbón de  $1,308 \times 10^6$  ton.<sup>\*\*\*\*</sup>

\*\* La combustión en lechos fluidizados consiste en colocar el car-- bón (en pequeños trozos) sobre un lecho de caliza, arena o cenizas calientes, a través del cual se hace burbujear aire. Ajustando el espesor del lecho y la velocidad del aire, se logran -- condiciones de calentamiento idóneas. Esto reduce además las -- emisiones de azufre y óxido de nitrógeno, altamente contaminantes.

\*\*\* Estudios Carboníferos en CFE.  
Subjefatura de Estudios Geológicos, Departamento de Estudios Car-- boníferos y Nucleares. México, D.F., octubre de 1985.

\*\*\*\* En ambos casos se habla únicamente de carbón no coquizable.

En la figura I.15 se muestran las principales localidades-carboníferas de la República Mexicana. En la actualidad las únicas cuencas explotadas son las del noreste del Estado de Coahuila y parte de Nuevo León, que son por otra parte las más conocidas, aunque la CFE ha realizado estudios en los Estados de Tamaulipas, Chihuahua, Sonora, Oaxaca, Veracruz, y San Luis Potosí.

Las reservas probadas in situ en la actualidad justifican 4,000 MW de operación continua por un período de 30 años,\*\* que corresponden a las plantas carbocelétricas José López Portillo con 1200 MW en 4 unidades de 300 MW c/u (actualmente en operación); carbón II (1,400 MW en 4 unidades de 350 MW c/u); y carbón III (1,400 MW).

\*\* Estudios Carboníferos en CFE.  
Subjefatura de Estudios Geológicos, Departamento de Estudios Carboníferos y Nucleares. México, D.F., octubre de 1985.

FIGURA 1.15) LOCALIDADES CARBONIFERAS DE LA REPUBLICA MEXICANA



Fuente: Boletín Energético, Agosto de 1979.

c) Combustibles Nucleares Fisionables.

Dentro de este concepto están considerados los recursos del llamado "Uranio Convencional", es decir de aquel que se obtiene tradicionalmente en las minas. En temas posteriores se tratarán los recursos de uranio considerados como "No Convencionales".

La energía nuclear representó en 1985 alrededor del 5% de las necesidades mundiales de energía, y entre el 12 y el 15% de las de energía eléctrica.\*\* Estudios recientes\*\*\* han estimado que para -- 1990 la energía nuclear representará cerca del 20% de la producción total de electricidad. Aunque durante los años 70 se preveía que -- las plantas nucleoelectricas proporcionarían, para el año 2,000, entre el 40 y el 50% de la producción de electricidad, es bastante probable que dicha cifra no pueda alcanzarse debido al freno mundial -- que han sufrido los programas nucleares, sin embargo, y tomando en -- cuenta que solo han pasado 45 años desde que se logró la primera --- reacción en cadena, es difícil pensar que exista alguna otra tecnología que haya ofrecido tan pronto sus servicios para la producción de electricidad.

\*\* Vladimir Baum en el documento "Will Nuclear Doubts Affect Growth?" (1985), estima que la participación mundial de la energía nuclear para este año fue de 14.9%.

\*\*\* Op. Cit.

Existen muchas razones a las que se debe el freno sufrido por los programas nucleares. Si bien la baja mundial de la demanda de energía eléctrica y los largos plazos de construcción de las centrales nucleoelectricas han contribuido de manera importante, no ha sido menor la influencia y presión ejercida por el desconocimiento - del público acerca del tema; por la actitud amarillista de los medios de difusión; y por diversos intereses socio-políticos involucrados en el asunto. Todo ello ha conllevado a la creencia de que las plantas nucleares son extremadamente peligrosas, lo cual no es completamente cierto, ya que como se verá más adelante, sus riesgos no son mayores que los de otro tipo de planta.

Las muertes relacionadas con diversos tipos de energía son generalmente mayores que aquellas causadas por accidentes nucleares.

En un estudio hecho en 1982 \*\* se mostró que en ese año hubo, por lo menos, 1662 muertes debidas a otras fuentes de energía; - 90 por empleo del carbón, 120 por el transporte de combustibles líquidos o gaseosos, \*\*\* 200 por la construcción de centrales hidroeléctricas (debido a la falla de una presa), \*\*\*\* 84 en plataformas petroleras; las cuales no causaron campañas publicitarias como las que se realizan cuando se producen accidentes nucleares, y ni siquiera propiciaron la exigencia de reglamentaciones más estrictas.

\*\* DE VECCHI, Appendini Bruno.  
Riesgos de los Reactores Nucleares Comerciales Moderados y Enfriados por Agua Ligera.  
Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Revista de la AMIME. Año XL, México, mayo-junio de 1986.

\*\*\* No debe olvidarse la explosión de un tanque de almacenamiento en San Juanico, México, que causó la muerte de cientos de personas.  
Aun más, en accidentes por gasoductos únicamente en México, - han muerto más personas que en todas las nucleoelectricas del mundo, incluyendo Chernobyl.

\*\*\*\* 5 días antes del accidente de Chernobyl ocurrió otra falla, en una presa de Sri Lanka, que dejó un saldo de más de 100 muertes.

De hecho, el riesgo de morir por roturas de presas, tan solo en los Estados Unidos, es por lo menos 1,000 veces mayor que el de morir por algún accidente en cualquiera de las 100 plantas nucleares --- existentes en ese país. El fallo de la presa de Morvi en la India en 1979 causó 15,000 muertos, muchos más que todos los que ha habido en - el mundo por accidentes nucleares.

Hablando de contaminación, las carboceléctricas por ejemplo - suelen serlo mucho más que las nucleoceléctricas, ya que su utiliza--- ción resulta contaminante para bosques, lagos, ciudades, además que pa--- rece ser que son las causantes de por lo menos algunos casos de cáncer, todo esto sin contar la liberación de partículas nocivas como óxido de nitrógeno, dióxido de carbono, etc.\*\*\* Por otra parte, una gran canti--- dad de las centrales que queman carbón emiten mucho más radiación a la atmósfera que las centrales nucleares.\*\*\*\*

\*\* DE VECCHI, Appendini Bruno.  
Riesgos de los Reactores Nucleares Comerciales Moderados y En---  
friados por Agua Ligera.  
Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Revista de la AMIME.  
Año XL, México, mayo-junio de 1986.

\*\*\* Todo esto no como consecuencia de algún accidente, sino como par---  
te del desarrollo normal de la planta.

\*\*\* EIBENSCHUTZ, Hartman Juan.  
Respuestas sobre Laguna Verde.  
Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Revista de la AMIME.  
Año XL, México, mayo-junio de 1986.

Por lo que respecta a la contaminación térmica, esta se da únicamente en el agua de circulación que se requiere para realizar el ciclo termodinámico, por ello generalmente las plantas nucleoelectricas se emplazan en lugares cercanos a la costa, mares o rios de gran caudal, a fin de poder disponer de grandes cantidades de agua y a la vez no afectar el ecosistema de los mismos al devolver las aguas con temperaturas ligeramente mayores que las normales de la zona. No debe olvidarse que la contaminación térmica no es algo privativo de las centrales nucleares, ni tampoco mayor que la producida por las centrales convencionales.

Otro aspecto muy manejado al hablar de energía nuclear es el que trata de lo concerniente a la radiactividad producida por las plantas nucleoelectricas, y a la disposición que debe darse a los desechos radiactivos.

Si bien es cierto que la radiactividad producida en las centrales nucleoelectricas representa un peligro potencial bastante alto, también lo es el hecho de que las mismas son las únicas instalaciones dedicadas a la producción de electricidad en las que se toman medidas de seguridad tan estrictas, lo cual reduce el riesgo a niveles iguales e incluso menores que los de las centrales convencionales. En general en las plantas nucleares suele contarse entre 5 y 7 barreras de radiactividad, que reducen los riesgos al mínimo.\*\*

\*\* La mayor parte de estas barreras son formas de contención de la radiactividad, y las otras tienen por objeto minimizar los efectos en caso de que las contenciones fallen.

Sin embargo, el hecho de que se tenga que contar con medidas de seguridad tan rigurosas en dichas plantas, ha contribuido notablemente a aumentar su costo por KW instalado, y por ende del KW/h producido.

En lo que toca a los desechos radiactivos<sup>\*\*</sup>, se han propuesto varias soluciones que aunque tal vez no sean las ideales, si representan una adecuada solución al problema.

Los desechos producidos como consecuencia de la fisión son altamente radiactivos y tienen vidas medias muy diversas, desde unos segundos hasta miles de años, lo cual obliga a tener que confinarlos en lugares en los que las posibilidades de escape sean mínimas.<sup>\*\*\*</sup>

Por ello normalmente se almacenan en domos salinos o en estructuras geológicas muy estables, también se llegan a almacenar en el interior de minas abandonadas y en el fondo del mar. China, por ejemplo, ha ofrecido aceptar los desechos radiactivos de diversos países y enterrarlos en el Desierto de Gobi.<sup>\*\*\*\*</sup> Como puede verse existen diversas soluciones al problema.

\*\* La producción de los mismos es constante, ya que los combustibles se sacan del reactor después de 3 a 5 años de producir electricidad, guardándose en tanques de refrigeración hasta que su radiactividad ha bajado lo suficiente para poder almacenarlos bajo condiciones controladas.

\*\*\* Por el contrario, el mineral de uranio se encuentra en yacimientos dispersos en la naturaleza sin ningún control.

\*\*\*\* VILLANUEVA, Carlos.  
Actividades de la CFE en Materia de Generación Nucleoeléctrica.  
Boletín IIE, pags. 217-225. México, noviembre-diciembre de 1985.

La energía nuclear resulta interesante y atractiva principalmente por la alta potencialidad energética del uranio, ya que 1 ton. de uranio puede producir tanta energía como 10,000 Tm de petróleo o 20,000 Tm de carbón.\*\*

En la actualidad su principal uso se encuentra en la producción de electricidad (consultar el apéndice A donde se muestra un bosquejo muy breve del funcionamiento de una planta nucleoelectrónica), sin embargo existen otros usos potenciales como la aplicación de calor para usos industriales o para la calefacción urbana, los cuales no se prevé tengan ningún desarrollo importante, a nivel mundial, hasta antes del año 2,020.\*\*\*

La estimación de los recursos mundiales de uranio resulta muy difícil debido a varios factores que van de los problemas de clasificación de los recursos, a la falta de información.

En la tabla I.8 aparecen los recursos de uranio razonablemente asegurados, y puede observarse que entre Estados Unidos, Australia, Sudafrica, Canadá, Brasil y China existen casi 60% más del 75% de dichos recursos. En la tabla I.9 se muestran los recursos adicionales estimados. Ambas estimaciones no incluyen los recursos de la Unión Soviética, Europa Oriental y China.

\*\* Cosmos. Gran Atlas Salvat.  
Los Recursos Naturales, Tomo IV, pag 80.  
Editorial Salvat, España 1984.

\*\*\* Aunque en algunos países como La URSS, Suecia, Albania, Francia, Canadá y Alemania, existen suficientes desarrollos para poder creer que existirá este tipo de utilización antes.

TABLE 1.8) RECURSOS MUNDIALES RAZONABLEMENTE ASSEGURADOS DE URANIO.  
(10<sup>3</sup> ton)

PAISES	Hasta 390/Kg U	980-130/Kg U	TOTAL
ALEXONIA	0.9	4.2	5.1
ARGENTINA (b)	26.0	—	26.0
ARGENTINA (b)	18.8	4.5	23.3
AUSTRALIA	314.0	22.0	336.0
AUSTRIA	0	0.3	0.3
BRASIL (a)	163.3	—	163.3
CANADA	0	0	0
CHINA	176.0	9.0	185.0
CHILE (a)	0	2.3	2.3
COREA	0	10.0	10.0
DINAMARCA	0	27.0	27.0
ESPAÑA	15.7	4.5	20.2
ESTADOS UNIDOS	131.3	275.9	407.2
FRANCIA	0	0	0
FRANCIA (a)	0	3.4	3.4
FRANCIA	56.2	11.3	67.5
GABON	18.7	4.7	23.3
GRECIA	0.4	0	0.4
INDIA	31.7	10.9	42.6
ITALIA	2.9	—	2.9
JAPON	7.7	—	7.7
MEXICO (a)	8.3	—	8.3
MEXICO	119.0	16.0	135.0
NIJERIA (b)	160.0	—	160.0
NIJERIA (a)	0.5	—	0.5
PERU	6.7	1.5	8.2
PORTUGAL (a)	18.0	—	18.0
REPUBLICA CENTROAFRICANA	0	6.6	6.6
RODASIA (c)	0	6.6	6.6
SUDAN	191.0	122.0	313.0
SUECIA	2.0	37.0	39.0
SWAZILANDIA (c)	2.5	2.1	4.6
ZAFRE (b)	1.8	—	1.8
TOTAL	1,473.4	575.0	2,048.5

(a) Uranio Contenido "In Situ".

(b) Uranio Contenido en minas.

(c) Incluye 35,000 ton. de Uranio contenidas en el depósito de Ranstad, en el cual se prohibió la producción de uranio, debido a un veto impuesto por las autoridades locales, a fin de proteger el medio ambiente.

Fuente: Uranium Resources, Production and Demand. (1983).

TABLE 1.9) RECURSOS MINERIALES ADICIONALES ESTIMADOS DE URANIO.  
(10<sup>3</sup> ton)

PAISES	Hasta \$80/Kg U	\$80-130/Kg U	TOTAL
ALEMANIA	1.3	6.9	8.2
ARGENTIA	---	---	---
ARGENTINA <sup>(b)</sup>	7.0	---	7.0
AUSTRALIA	369.0	25.0	394.0
AUSTRIA	0.7	1.0	1.7
BRASIL <sup>(a)</sup>	92.4	---	92.4
CANADA	0	1.2	1.2
CANADA	181.0	48.0	229.0
CHILE	0	2.3	2.3
DEMARCA	0	16.0	16.0
TIEMPO <sup>(b)</sup>	0	5.0	5.0
ESPAÑA	5.0	---	5.0
ESTADOS UNIDOS	30.4	52.2	82.6
FINLANDIA <sup>(a)</sup>	---	---	---
FRANCIA	26.6	6.2	32.9
GABON	1.3	8.3	9.6
GRECIA	6.0	0	6.0
INDIA	4.8	14.6	19.3
ITALIA	---	1.0	1.0
MEXICO <sup>(a)</sup>	2.4	---	2.4
NANIBIA	30.0	23.0	53.0
NIGERIA <sup>(b)</sup>	53.0	---	53.0
PERU	---	---	---
PORTUGAL	1.0	---	1.0
REPUBLICA CENTROAFRICANA	---	---	---
SUDAN <sup>(a)</sup>	0	3.4	3.4
SUDAFRICA	99.0	48.0	147.0
SUECIA <sup>(c)</sup>	0.3	43.0	43.3
TURQUÍA	---	---	---
ZAMBIA <sup>(b)</sup>	1.7	---	1.7
TOTAL	912.9	305.1	1,218.0

(a) Uranio contenido "In Situ".

(b) Uranio contenido en menas.

(c) Incluye 40,000 ton. de uranio contenidas en el depósito de Rarstad, en el cual se prohibió la producción de uranio, debido a un veto impuesto por las autoridades locales, a fin de proteger al medio ambiente.

Fuente: Uranium Resources, Production and Demand. (1983).

Los recursos de uranio de la URSS y de Europa del Este - se calculan de acuerdo con evaluaciones razonables en  $300 \times 10^3$  toneladas, mientras que los de China se estiman en más de  $116 \times 10^3$  toneladas, con lo que se obtiene un total de recursos mundiales razonablemente asegurados (a precios de hasta \$80/Kg U) de  $1,889 \times 10^3$  toneladas.

Los países industrializados son los mayores productores de energía nuclear, con más de las dos terceras partes del total, - repartiéndose el resto en partes casi iguales entre los países en - desarrollo y los de economía centralizada. La importancia de esta fuente energética varía mucho de país a país, ya que en algunos como Francia, Bélgica, Taiwan (China), y Suecia, su participación representa el 64.8, 59.8, 52.0, y 42.3% respectivamente; mientras que en otros como Canadá, La República Democrática Alemana, Argentina y la URSS, representa el 12.7, 12.0, 11.3, y 10.3% respectivamente de la producción total de electricidad.\*\* En la actualidad únicamente 7 países en vías de desarrollo cuentan con plantas nucleares para - la producción de electricidad.

\*\* BAUM, Vladimir.  
Will Nuclear Doubts Affect Growth?  
World Electricity.  
Petroleum Economist, August 1986.

En 1985 la capacidad instalada en plantas nucleoelectricas - en todo el mundo fue de casi 250 GWe, lo cual equivale a la produccion mundial de electricidad en 1954, y a la quema de 546 millones de toneladas de carbon.\*\* De esos 250 GWe, el 58.3% corresponde a -- reactores de agua ligera a presion, el 24.2% a reactores de agua ligera hirviente, el 11.8 a reactores moderados por grafito, el 5.2% a reactores de agua a presion, y el 0.5% restante a reactores rapidos de cfa.

El estado de los reactores nucleares, proporcionado por la International Atomic Energy Agency, al 1 de enero de 1986 es el siguiente:

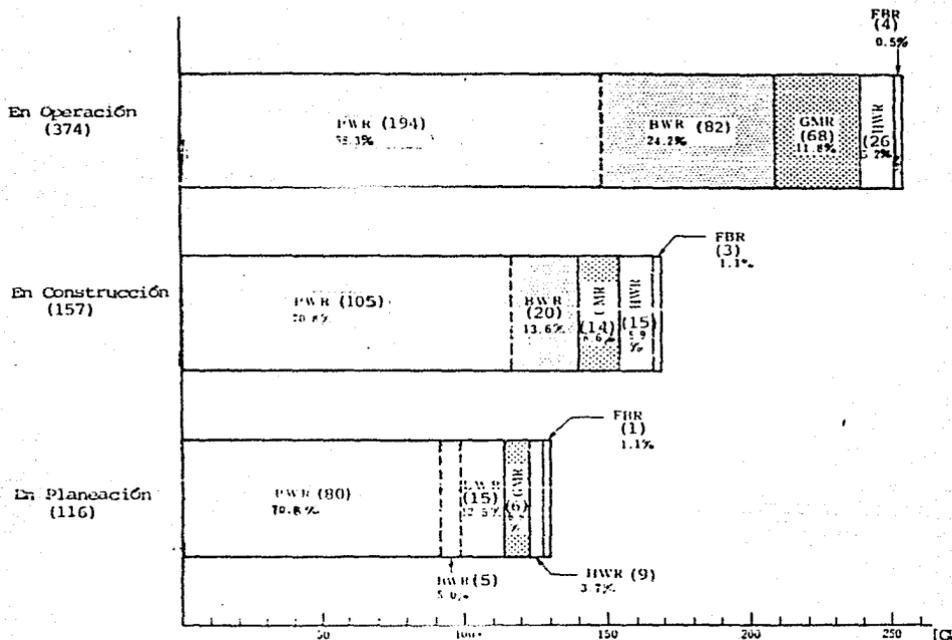
- 374 reactores en operacion	249,625 MWe
- 157 reactores en construccion	141,942 MWe
- 116 reactores en planeacion	<u>112,700 MWe</u>
	504,267 MWe

En la figura 1.16 se muestra dicho estado en base a los tipos de reactores.

Las necesidades de recursos nucleares dependeran de las tecnologias que se utilicen; ya sea reactores termicos de fisión unicamente o la introduccion adicional de los reactores de neutrones rapidos o reactores de cfa.

\*\* BAUM, Vladimir.  
Will Nuclear Doubts Affect Growth?  
World Electricity.  
Petroleum Economist, August 1986.

FIGURA I.16) ESTADO ACTUAL DE LOS REACTORES NUCLEARES EN BASE A SU TIPO.



PWR = Reactor de agua ligera a presión.  
 BWR = Reactor de agua ligera hirviendo.  
 LWR = Reactor de agua ligera.  
 GMR = Reactor moderado por grafito.  
 FBR = Reactor de agua pesada a presión.  
 FBR = Reactor rápido de uranio.

Nota: Las cantidades entre paréntesis indican el número de unidades.

Fuente: Nuclear Power Plants in the World. (1986).

En la naturaleza el uranio se encuentra en las siguientes -  
proporciones:

$$U_{238} = 99.27\%$$

$$U_{235} = 0.72\%$$

$$U_{234} = 0.0055\%$$

De los cuales solo el  $U_{235}$  es fisiónable.

Los reactores térmicos de fisión actualmente en uso emplean el uranio muy ineficientemente, ya que utilizan como material fisiónable el isótopo  $U_{235}$ , y como se mencionó anteriormente el uranio natural únicamente contiene 0.7% de ese isótopo. De hecho, la mayoría de las centrales nucleares no utilizan el uranio tal y como sale de las minas, sino que se le enriquece hasta obtener una concentración del isótopo  $U_{235}$  de entre 1.5 y 4% aproximadamente, denominada torta amarilla o yellow cake, la cual constituye la materia prima -- para la fabricación de los combustibles de los reactores nucleares.

Es precisamente debido a este enriquecimiento tan bajo del uranio de las centrales nucleoelectricas\*\*, que es imposible que --- dichas plantas puedan explotar como bombas atómicas (si hubiere alguna explosión esta sería del tipo químico como en Chernobyl), por lo que el miedo de gran cantidad del público a este respecto es totalmente infundado.

\*\* Las bombas atómicas utilizan uranio enriquecido aproximadamente al 99%.

Como las reservas de uranio son limitadas, se considera que de continuarse desarrollando exclusivamente los reactores térmicos de fisión para la generación de energía eléctrica, el uranio se agotaría antes o al mismo tiempo que el petróleo. Aunque debido al freno en la construcción de centrales nucleocelétricas antes mencionado, no se cree que esto pueda darse antes del año 2,000.

Se estima que los stocks actuales de uranio representan aproximadamente el equivalente al requerimiento de los próximos 4 o 5 años de los reactores nucleares.\*\*

Le da el interés que presenta el desarrollo de los reactores de neutrones rápidos o reactores de crfa. En estos reactores el combustible se compone de plutonio (que se obtiene al reprocesar el combustible irradiado de los reactores térmicos de agua ligera o agua pesada) y de uranio natural. Al mismo tiempo que consumen plutonio, los reactores de crfa convierten el isótopo  $U_{238}$  (que constituye el 99.27% del uranio natural), en neptunio, el cual por desintegración se convierte en plutonio.

\*\* Uranium Resources, Production and Demand.  
OECD, Nuclear Energy Agency.  
International Atomic Energy Agency, December 1983.

Por lo que los reactores se pueden diseñar de manera que produzcan más plutonio del que consumen.\*\* Es esta propiedad de los reactores de crfa, la que permite utilizar casi toda la energía de fisión contenida en el uranio, y economizar así de una manera considerable esta materia prima, con lo que se logra multiplicar por un factor de 70 el potencial energético de los recursos de uranio con respecto al que se tiene al utilizarlos en los reactores térmicos actuales que utilizan el uranio natural o uranio ligeramente enriquecido como combustible.

Para el caso de México, de la tabla I.8 puede obtenerse -- que ocupa el décimo quinto lugar del mundo por sus reservas (de hasta \$80/Kg), con el 0.56% del total, esto sin contar las reservas de la URSS, China y Europa del Este; se estima que dentro de este gran total las reservas de México asciendan al 0.43%, lo cual es un porcentaje mayor de lo que representan sus reservas de carbón en el mundo. Se consideran también unos recursos adicionales para México de  $2.4 \times 10^3$  ton, unas reservas probables de  $32 \times 10^3$  ton., y unas reservas potenciales de  $225 \times 10^3$  ton.

\*\* Si bien los reactores rápidos generan más material fisible del que consumen, tardan un mínimo de 10 años en generar una cantidad de plutonio suficiente para ser utilizada como combustible en un nuevo reactor. El período de tiempo necesario para que un reactor rápido genere material fisible en cantidad igual a la precisa para la carga inicial del reactor se denomina tiempo de duplicación del reactor.

Las áreas uraníferas confirmadas y más prometedoras se localizan en diversas regiones de la vertiente oriental de la Sierra Madre Occidental, principalmente en los Estados de Chihuahua y Durango; en la parte central del Estado de Sonora; en la zona limítrofe entre los Estados de Nuevo León y Tamaulipas; y en la parte centro-occidental del Estado de Coahuila.\*\*

Existen otras localidades radiactivas o uraníferas que se han registrado en los estados de Zacatecas, San Luis Potosí, Sinaloa, Querétaro y Guanajuato, entre otros, pero que o no son de mucha importancia, o no han sido bien exploradas.

En la tabla 1.10 se muestran de forma detallada las reservas de uranio de México, esta información se publicó en el número de mayo de 1982 del boletín "energéticos", y puede apreciarse que el total de 8,993.8 ton. de uranio es ligeramente mayor que el de 8,300 ton reportado por la OECI en el documento Uranium Resources, Production and Demand en 1983.

\*\* ESCOFET, Artigas Alberto; RODRIGUEZ Soto Enrique; CASTILLO, Nieto Fernando. El Uranio en México. Programa Universitario de Energía. Julio de 1984.

El programa de energía <sup>\*\*</sup> reconoce que las reservas probadas actuales de uranio <sup>\*\*\*</sup> solo alcanzan para la vida útil de la planta nucleoelectrónica de Laguna Verde, en Veracruz. Esta planta contará con 2 unidades del tipo BWR (reactor de agua ligera hirviente) de 654 Mwe cada una para un total de 1,308 Mwe; además la recuperación de uranio como subproducto del procesamiento de la roca fosfórica existente en el país, permitirá alimentar una planta adicional de 1,200 Mwe, con lo que se llegará a un total de 2,508 Mwe. <sup>\*\*\*\*</sup>

\*\* Programa de Energía.  
Metas a 1990 y proyecciones al año 2000.  
Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial, 1980.

\*\*\* Debe tomarse en cuenta que hasta el momento solamente se ha explorado un poco más del 15% de la superficie del territorio mexicano, por lo que las posibilidades de encontrar yacimientos importantes todavía son amplias.

\*\*\*\* Op. cit., punto 120.

Tabla 1.10 MIZHO, MINERIAS ESTIMADAS DE  $U_3O_8$   
(Enero de 1981).

Sitio	Grado Promedio (% de $U_3O_8$ )	Toneladas de U
<b>Chihuahua</b>		
El Royal	0.29	311.5
Margaritan - Puerto III	0.12	1,062.4
	0.12	1,524.9 <sup>a/</sup>
Royal III	0.10	176.9
La Granitilla	0.25	57.6
Otros (Explotaciones mineras)	0.20	325.4
	0.05 - 0.2	87.2
(Hoteles y concentrados)		62.1
<b>Sonora</b>		
Los Angeles	0.19	409.9
	0.05	493.6 <sup>a/</sup>
Tráfico Nueva	0.06	178.6
San José	0.04	178.6
Otros	0.07	122.5
<b>Durango</b>		
La Provesa	0.06	181.2
	0.06	193.3 <sup>a/</sup>
El Mesquite	0.05	77.6
Otros	0.06	78.5 <sup>a/</sup>
<b>Nuevo León</b>		
La Cruz	0.20	1,134.0
Reparista	0.20	1,221.1
El Chavato	0.03	684.4
Otros	0.07	437.5
		<u>8,993.8</u>

<sup>a/</sup> Indicado

Fuente: Boletín Estadístico, Mayo de 1982.

Debe entenderse que la planta nucleoeléctrica de Laguna Verde no se concibió para responder a un programa nucleoeléctrico, sino a fin de que México pudiera iniciarse en la utilización de este tipo de fuente energética, debido a que la realización de plantas nucleares requiere de alta tecnología (por lo menos en algunos de los componentes más importantes), y grandes medidas de seguridad.

Por lo que su realización permitiría crear la infraestructura necesaria a fin de poder satisfacer a futuro las necesidades de energía eléctrica, a través de este tipo de planta.

Se ha calculado que el costo total de operación, incluyendo inversión, combustible y mantenimiento para Laguna Verde, será comparable al de una central a base de combustóleo a un precio del orden de quince dólares por barril, y cerca de un 7% más barata que la generación a base de carbón, utilizando carbón nacional.\*\*

Aunque esto es cierto debe tomarse en cuenta que se está hablando del costo económico y no del financiero. Desde este último punto de vista el costo de Laguna Verde se ha visto notablemente incrementado, ya que en base a los planes originales, la primera unidad debió terminarse de construir en 1982, y la segunda en 1983.

\*\* EIBENSCHUTZ, Hartman Juan.  
Respuestas sobre Laguna Verde.  
Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Revista de la AMIME. Año XL,  
México, mayo-junio de 1986.

Un factor que puede resultar muy importante, y a favor, - del desarrollo de plantas nucleoelectricas en México, es que en la actualidad estas puedan construirse con una integración nacional de entre 65 y 75% en costo \*\*, lo que permite que la salida de divisas no sea muy grande, independientemente de que de incrementarse aún - más el porcentaje de integración, se disminuirá tanto la salida de divisas como la dependencia tecnológica.

Aunque la participación de la energía nuclear en la generación de electricidad en México es aún incierta, estudios hechos - por la Gerencia de Estudios de la CFE han concluido que sería conveniente tener en México, para el año 2,010, una capacidad instalada a través de plantas nucleoelectricas, del orden 25,000 MW \*\*\*, de--- biendo representar esta cifra para esas fechas cerca del 25% de la capacidad instalada total para la producción de energía eléctrica.

\*\* VILLANUEVA, Carlos.  
Actividades de la CFE en Materia de Generación Nucleoelectrica.  
Boletín IIE, pags. 217-225. México, noviembre-diciembre de 1985

\*\*\* Idem. al anterior

Resumiendo se tiene que el contenido energético de las reservas probadas mundiales de recursos convencionales no renovables -- son:

PETROLIO:  $670 \times 10^9$  barriles = 4 171.20 Exajoules (1 Exajuole =  $10^{18}$  joules).

Donde: 1 tonelada equivalente de petróleo (TEP) = 7.3 barriles =  $45.4 \times 10^9$  joules).

GAS NATURAL:  $2\ 911.3 \times 10^{14}$  ft<sup>3</sup> = 3 244.80 Exajoules.

Donde: 1 ft<sup>3</sup> = 0.02831 m<sup>3</sup>; 1000 joules =  $0.0254 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>

CARBON:  $882 \times 10^9$  ton =  $687 \times 10^9$  toneladas equivalentes de carbón (TEC) = 20 129.1 Exajoules.

Donde: 1 TEP =  $29.3 \times 10^9$  joules.

URANIO:  $1889 \times 10^3$  ton = 1 190.07 Exajoules.

Donde: 1 ton de Uranio =  $630 \times 10^{12}$  joules.

Finalmente el contenido energético total es de 28 735.17 - Exajoules.

## II.1.2) Renovables.

A pesar de la importancia de este tipo de recursos y de -- sus lógicas ventajas sobre los recursos no renovables, actualmente -- solo representan aproximadamente un 15% de la oferta mundial de ener-- gía.

Se entenderán como recursos renovables, aquellos que explotados de una manera racional son susceptibles de utilizarse de una -- manera continua (en un ciclo) sin agotarse; o aquellos que se producen de manera continua y que por su magnitud y disponibilidad son -- prácticamente infinitos en base a la actual escala humana de consumo.

En el presente trabajo se han definido como recursos convencionales renovables, los siguientes:

- d) Recursos Geotérmicos Hidrotermales.
- e) Recursos Hidráulicos.
- f) Recursos de Biomasa Convencional. (Madera y Carbón -- Vegetal).

d) Recursos Geotérmicos Hidrotermales.

Debido a la importancia que la geotermia reviste en este -- trabajo, se le dedican la segunda y tercera partes del mismo por completo.

La segunda parte trata de la geotermia en general, mientras que en la tercera parte se presenta una metodología para el desarrollo proyectos geotérmicos, por lo que si se desea más información sobre el recurso, deberán consultarse dichas partes.

En el apéndice A se muestra también de una manera muy breve el funcionamiento básico de una planta geotermoeléctrica.

e) Recursos Hidráulicos.

La energía hidráulica consiste en realidad en un aprovechamiento indirecto de la energía solar, la cual produce un ciclo hidrológico que permite que esta fuente sea renovable.

En la actualidad proporciona alrededor del 4 al 5% de la -- energía total utilizada en el mundo, y entre el 23 y el 25% de la -- energía eléctrica, siendo esta su principal utilización; aunque no de biera menospreciarse su utilización a pequeña escala con otros fines distintos a los de producción de electricidad, como podrían ser el -- movimiento de molinos, bombas, etc., y que en determinadas zonas muy específicas, como el caso de pequeñas comunidades aisladas, podrían -- tener una considerable aportación.

De ese 4 a 5%, más de las dos terceras partes es producido por los países industrializados, repartiéndose el resto en partes casi iguales entre los países en desarrollo y los de economía centralizada.

En la tabla 1.11 se muestra la distribución geográfica del potencial hidroeléctrico mundial, y permite corroborar como únicamente los países industrializados han desarrollado de una manera importante su potencial hidroeléctrico.

En la actualidad la capacidad instalada en el mundo en --- plantas hidroeléctricas es de 372,000 MW, con una producción anual de energía eléctrica de 1.6 millones de GWh, mientras que el potencial hidroeléctrico mundial se estima en 2.2 millones de MW, con una producción anual de energía eléctrica de 9.7 millones de GWh.

Si se produjera esta energía en plantas termoeléctricas se necesitaría quemar poco más de 40 millones de barriles de petróleo - por día.\*\*

El potencial hidroeléctrico en operación representa actualmente solo el 17% del total, y se prevé que para el año 2 020,- se habrá desarrollado el 80% del potencial hidroeléctrico mundial,\*\*\* lo cual se debe a que se considera que los desarrollos hidroeléctricos recibirán en todo el mundo una renovada e intensa consideración,

\*\* VIQUEIRA, Landa Jacinto.  
Apuntes de la Materia Energía y Desarrollo Económico.  
Maestría en Ingeniería Energética, DEPEFI, UNAM., 1985.

\*\*\* Idem al anterior.

ANEXO I.11) POTENCIAL HIDROELECTRICO MUNDIAL  
(GENERACION ANUAL)

REGION	POTENCIAL TEORICO $10^{12}$ kWh	POTENCIAL TEORICO $10^{12}$ kWh	POTENCIAL TEORICO 1 de col. 1	POTENCIAL EN $10^{12}$ kWh	POTENCIAL EN 1 de col. 2	POTENCIAL EN GENERACION $10^{12}$ kWh	POTENCIAL EN ESTRUC. $10^{12}$ kWh
Africa	10.118	3.14	31.0	0.151	3.1	0.047	0.201
Northamérica	6.15	3.12	50.7	1.129	35.2	0.303	0.342
América Latina	5.67	3.78	66.7	0.250	7.5	0.355	0.899
Asia (sin la URSS)	16.405	5.34	32.4	0.465	10.7	0.080	0.368
Oceania	1.5	0.39	25.0	0.059	15.1	0.020	0.032
Europa	4.36	1.43	32.0	0.842	57.0	0.094	0.197
URSS	3.94	2.19	55.0	0.498	10.1	0.101	0.17
TOTAL	44.55	19.39	48.0	3.707	100.0	1.000	2.12

Fuente: XI Conferencia Mundial de Energía. (1980).

debido a las siguientes ventajas sobre otras fuentes:

a) La energía hidráulica es un recurso renovable debido a la energía solar, que produce el ciclo hidrológico. Su uso para generar electricidad permite ahorrar el consumo de recursos no renovables y prolongar así la disponibilidad de estos.

b) La larga vida de las instalaciones y los bajos costos de operación hacen que el costo de la energía generada sea muy poco afectado por la inflación, al contrario de lo que ocurre con las plantas termoeléctricas, donde el aumento de precio de los combustibles afectan forma importante el costo de la energía generada.

c) Los desarrollos hidroeléctricos pueden ser parte de aprovechamientos hidráulicos de usos múltiples, que benefician a la agricultura y a otros sectores, por lo que los costos se prorratan entre los diferentes usos.

d) La energía hidráulica no es contaminante<sup>\*\*</sup>, y su impacto ambiental puede manejarse de manera que en general presente aspectos más favorables que desfavorables.

e) La energía hidroeléctrica se puede producir en grandes plantas generadoras o en pequeñas plantas en regiones remotas de países poco desarrollados y contribuir así a mejorar las condiciones de vida locales.

<sup>\*\*</sup> Aunque los dispositivos necesarios para su aprovechamiento (presas) si son relativamente contaminantes.

f) La flexibilidad de operación de las plantas hidroeléctricas las hace especialmente útiles en los grandes sistemas eléctricos.

En el apéndice A se muestra de manera esquemática el bosquejo de funcionamiento de una planta hidroeléctrica.

Para el caso de México, de acuerdo con la evaluación hecha por la Comisión Federal de Electricidad en 1980, se tiene que el potencial identificado es de 171,000 GWh/año, lo cual corresponde al 1.75% del potencial mundial. Cifra que corresponde además, al triple de la generación total de energía eléctrica producida en 1979.

Este potencial podría generarse mediante el desarrollo de 540 aprovechamientos, una buena parte de ellos ubicados en el sur del país.\*\*

A 1985 se tienen instalados en plantas hidroeléctricas poco más de 6,500 MW, con una generación aproximada de 22,500 GWh, lo cual representa un poco menos del 18% del potencial total, y a la vez muestra que las posibilidades de desarrollo dentro de esta área son muy grandes.

\*\* Aunque es cierto que en el sur del país existen muy buenas perspectivas, estas quedan restringidas por la capacidad de transmisión existente en la zona, y por la dificultades que implica la conducción de energía eléctrica a los centros poblacionales importantes.

Además el potencial teórico es bastante mayor que el potencial identificado, por lo que las posibilidades de que este último - sea aun mayor son bastante buenas. Esta relación se estima actualmente del orden de 0.39.\*\*

Si se supusiera un consumo anual de energía de 400 000 GWH para el año 2 000, o sea unas 7 veces mayor que el de 1979, la energía eléctrica proporcionada por las plantas hidroeléctricas, podría representar el 43% del total, en el supuesto caso de que para ese entonces se tuviera desarrollado el total del potencial hidroeléctrico identificado hasta el momento en el país.\*\*\*

En la tabla 1.12 se muestra el potencial hidroeléctrico identificado de México; en la tabla 1.13 aparece dicho potencial por entidad federativa; y en la figura 1.17 se muestra la distribución espacial del potencial hidroeléctrico identificado.

\*\* El potencial hidroeléctrico teórico anual se calcula a partir de la precipitación anual de cada región y la altura sobre el nivel del mar de la superficie que recibe la precipitación.

\*\*\* Aunque esto es teóricamente factible habría que realizar un análisis a fondo para determinar si eso sería realmente conveniente.

TABLA I.12) RESUMEN DEL POTENCIAL HIDROELECTRICO IDENTIFICADO DE MEXICO.

	<u>POIENCIA</u> (MW)	% DEL TOTAL	<u>ENERGIA</u> <u>ANUAL</u>	% DEL TOTAL
EN OPERACION	6,835	19.04	23,351	13.83
EN CONSTRUCCION	1,292	3.60	4,602	2.73
EN PROGRAMA	1,790	4.59	4,353	2.58
PENDIENTE DE DESARROLLAR	<u>25,977</u>	<u>72.37</u>	<u>136,535</u>	<u>80.87</u>
T O T A L	35,894	100.00	168,841	100.00

Fuente: Informe de Operación de la CFE de 1985; POISE de la CFE de Octubre de 1986; y Datos proporcionados al autor por la Corencia de Proyectos Hidroeléctricos de la CFE.

TABLA 1.131 POTENCIAL HIDROELECTRICO IDENTIFICADO POR ENTIDAD FEDERATIVA.

ESTADO	No. Proys.	POT. MEDIA ( Mw )	GEN. MEDIA ( Gwh )	POTENCIA ( Kw )	GENERACION ( Kwh )
Coahuila	1	14	123	0.1	0.1
Colima	3	47	368	0.2	0.2
Chiapas	91	6,558	57,430	33.4	33.4
Cihuahua	24	613	5,371	3.1	3.1
Durango	26	701	6,144	3.6	3.6
Guerrero	33	1,826	15,995	9.3	9.3
Guatemala	2	42	368	0.2	0.2
Hidalgo	7	127	1,113	0.6	0.6
Jalisco	31	783	6,897	2.2	2.2
México	14	353	3,098	1.8	1.8
Michoacán	59	768	6,728	3.9	3.9
Morelos	2	66	578	0.3	0.3
Nayarit	30	656	7,501	4.4	4.4
Nuevo León	1	5	44	0.0	0.0
Oaxaca	66	2,505	21,964	12.8	12.8
Puebla	28	617	7,159	4.2	4.2
Querétaro	4	137	1,200	0.7	0.7
San Luis Potosí	21	447	3,918	2.3	2.3
Sinaloa	24	527	4,617	2.7	2.7
Sonora	15	414	3,628	2.1	2.1
Tabasco	8	209	1,830	1.1	1.1
Tlaxcala	10	90	833	0.5	0.5
Veracruz	62	1,614	14,137	8.2	8.2
Zacatecas	6	116	1,035	0.6	0.6
TOTAL	541	19,614	171,965	100.0	100.0

Fuente: Estado Actual de la Evaluación del Potencial Hidroeléctrico Nacional. (1980).

FIGURA 1.17) DISTRIBUCION ESPACIAL DEL POTENCIAL IDENTIFICADO Y POTENCIAL TEORICO EN LOS ESTADOS DE LA REPUBLICA MEXICANA Y LA RELACION ENTRE CADA CATEGORIA.



NOTA: I/T es la relación entre el potencial identificado y el potencial bruto teórico.

Fuente: Estado actual de la Evaluación del Potencial Hidroeléctrico Nacional. (1990).

f) Recursos de Biomasa Convencional. (Madera y Carbón Vegetal).\*\*

Dentro de este grupo quedan incluidas la madera y el carbón vegetal, debido a la importancia tan grande que estos recursos tienen y han tenido desde la antigüedad en el desarrollo del hombre.

Sin embargo, hasta el momento no se ha podido cuantificar de una manera precisa su importancia a nivel mundial.

De hecho existen otros recursos de biomasa (consultar el capítulo II.2.2, correspondiente a biomasa no convencional), aunque no tienen una utilización tan difundida y amplia como los anteriores, debido a que en general para su aprovechamiento se necesita de cierta tecnología y equipo que ni la madera ni el carbón vegetal requieren.

La utilización de la madera y el carbón vegetal es muy amplia, sobre todo en los países en desarrollo y en ciertas zonas del mundo, e incluso vital para la subsistencia de millones de personas.

Se ha calculado que más de 2,250 millones de personas utilizan en la actualidad la biomasa para satisfacer sus necesidades primarias de energía.\*\*\*

\*\* El carbón vegetal no es un recurso primario en sí de energía, ya que el hombre lo produce a partir de la madera, sin embargo debido a su uso tan amplio y común en todo el mundo, se le ha incluido en este capítulo.

\*\*\* Informe del Grupo Técnico sobre Energía de la Biomasa. 20. Período de sesiones, Asamblea General de las Naciones Unidas (1981).

Ambos recursos son renovables, pero debe tomarse en cuenta que no se pueden explotar indiscriminadamente, sino que su explotación se deberá hacer de manera racional y conservadora, a fin de no acabar con los recursos forestales del mundo y con ello dañar seriamente a la ecología mundial, con repercusiones que aun ahora no pueden valorarse de manera precisa.

Es claro que aunque el crecimiento teórico potencial anual de los recursos forestales del mundo, estimado en  $74 \times 10^9$  ton de -- carbono al año, equivalente a aproximadamente  $200 \times 10^9$  ton de materia orgánica, con un contenido energético de entre 2.000 y  $3.000 \times 10^6$  TJ\*\*, excede en mucho (cerca de 6 veces) el consumo actual mundial de energía, no es posible explotarlos debido a su aislamiento y a las consecuencias ecológicas mencionadas anteriormente.

En los últimos años se ha hecho evidente que la demanda de madera en algunos sitios ha excedido en muchos casos la oferta natural existente en los árboles y bosques, lo cual ha dado por resultado un daño ecológico, que para agravar más las cosas se ha convertido también en un daño económico y social para muchas comunidades del orbe, y particularmente para los países del tercer mundo\*\*\*.

\*\* Ya que el contenido de energía varía de 10 a 15 GJ/ton de materia orgánica, dependiendo de su grado de humedad.

\*\*\* En estos el potencial disminuye más rápidamente debido, principalmente, al elevado incremento de la población y a la falta de desarrollo cultural, económico, técnico, etc.

A pesar de eso, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Fuentes de Energía Nuevas y Renovables celebrada en 1981, concluyó que por el momento no existe ninguna fuente alternativa de energía que pueda substituir de una manera viable a la madera y el carbón vegetal, en una escala en la que se pueda reducir la dependencia de la misma para los países subdesarrollados y pobres, en -- por lo menos los próximos 25 años. Su pobreza y lejanía de muchos de ellos, hacen inaccesibles otras fuentes de energía para sus posibilidades.

Desde el descubrimiento del fuego, la madera ha sido la principal fuente renovable de energía para muchísimas tareas básicas como cocinar, calefacción, defensa, construcción de casas, etc. La madera y otros combustibles orgánicos son la mayor fuente de energía para la sobrevivencia del mundo pobre, ya que para vivir la gente necesita comer, y para que mucha comida pueda ser comestible se necesita cocinar.

El estudio de las Naciones Unidas citado anteriormente, sobre madera y carbón vegetal, estima que cerca de la mitad de la humanidad depende de la madera, o de sus derivados, el carbón vegetal, o en su ausencia de los residuos agrícolas y del estiércol animal, para fines de cocina.

Por otra parte el consumo de madera ha jugado un papel muy importante en diversas actividades industriales, como la del acero; producción de acero, papel; y en la industria de la construcción.

Sin embargo en los últimos 200 años, desde el descubrimiento de los combustibles fósiles que pueden utilizarse más eficientemente, el uso de la madera y el carbón vegetal ha decaído, representando en la actualidad un papel menor a nivel mundial.\*\*

A pesar de este decaimiento en su uso, en el estudio hecho por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la comida y la agricultura), para la conferencia citada anteriormente, se obtuvo que más de 100 millones de personas viven en situaciones en las cuales no les es factible obtener la suficiente madera para proveerse al menos del mínimo de sus necesidades de energía. Y hay por lo menos otros mil millones que sufren de carencias de la misma, aunque en proporciones mucho menores. Se espera que de continuar la tendencia actual esta cifra aumente considerablemente para el año 2000, ya que para entonces se necesitará proveer a más de 2500 millones de habitantes rurales, con otros combustibles para cocinar, que reemplacen a la madera. En la tabla I.14 se muestran las poblaciones con déficit de madera, y se puede apreciar que esto es un fenómeno característico de los países en vía de desarrollo.

\*\* Principalmente en los países industrializados y en desarrollo.

Tabla: I.141 Población con déficit de madera g/  
(millones de personas)

REGIÓN	1980						2000			
	Exceso crítico		Déficit		Probable déficit		Exceso crítico		Déficit	
	Total	Rural	Total	Rural	Total	Rural	Total	Rural	Total	Rural
África	51	49	146	131	112	102	86	74	447	390
Medio Oriente y Nortáfrica			104	69					268	158
Asia y el Pacífico	31	31	645	551	308	271	238	53	1 532	1 441
Latinoamérica	15	9	104	82	158	99	35	13	523	236
Total	101	89	999	833	578	472	356	140	2 770	2 228

a) Población total y población con consumo de energía de tipo predominantemente rural (población total menos los centros urbanos con más de 100,000 habitantes); (Estas son las poblaciones estimadas que viven en áreas en que la situación maderera está identificada).

Fuente: Report of the Technical Panel on Fuelwood and Charcoal. O.N.U. (1981)

La madera es regularmente el combustible preferido por las comunidades rurales, debido a su disponibilidad local, a que no requiere de equipos caros ni complejos para su utilización, y más que nada, a que en la mayor parte de las regiones, su uso no lleva consigo ningún costo financiero al usuario.

Sin embargo tiende a ser substituida por el carbón vegetal, un combustible más conveniente desde el punto de vista de eficiencia, pero que desgraciadamente ha sido producido también a través de procesos muy ineficientes.

Socialmente utilizada y ambientalmente aceptable, la madera muestra claras ventajas como fuente renovable y substancial de energía.

La estimación del consumo mundial de madera y carbón vegetal es muy imprecisa, ya que la mayoría de los países no poseen estadísticas al respecto. Se estima que este consumo se ha mantenido constante a nivel mundial de un valor entre  $15,000 \times 10^3$  - TJ/año ( 1 Terajoule = 1 TJ =  $10^{12}$  joules), a  $30,000 \times 10^3$  TJ/año entre 1925 y 1975, por lo que representó entre un 50 y un 75% en 1925, a solo entre un 5.5 y un 13% en 1975 del consumo total mundial. Aunque algunos autores opinan que este consumo puede llegar incluso a un 15%. Sin embargo los más recientes estudios parecen mostrar que un valor razonable está entre un 9 y un 10%.

Sea cual fuere el caso, es un hecho que la madera y el carbón vegetal son en la actualidad más importantes a nivel mundial (desde el punto de vista del consumo energético), que la energía hidráulica, la energía nuclear y la geotermia juntas. En la tabla I.15 se muestra la participación de la madera en el consumo mundial de energía en 1978. Hay que aclarar que el mismo estudio de las Naciones Unidas que proporciona estas cifras, reconoce que es muy probable que el porcentaje de 5.4% dado para la madera y el carbón vegetal sea considerablemente mayor, debido a lo impreciso de los datos con que se obtuvo y la cantidad tan pequeña de estadísticas al respecto.

Los recursos de madera y carbón vegetal representan entre el 1 y el 2% del total de consumo de energía de los países desarrollados, aunque la cifra llega a variar hasta un 5% en los países que a pesar de ser desarrollados, cuentan con grandes extensiones boscosas, como es el caso de Suecia, que se estima tiene un consumo de madera y carbón vegetal de 8% sobre su total. En general los principales usuarios de el citado recurso en los países desarrollados, lo constituyen básicamente los habitantes de las áreas rurales y boscosas de los mismos.

El consumo anual de madera y carbón vegetal (para fines energéticos) de estos países representa aproximadamente el 10% del uso total de la madera.

Tabla: I.15) LOS COMBUSTIBLES DE MADERA EN EL CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA EN 1978

	Población (millones)	total de combustibles de madera a/ (millones de m <sup>3</sup> )	Consumo per cápita (m <sup>3</sup> )	Energía b/ equivalente de combustibles de madera (millones de gigajoules)	Energía c/ comercial (millones de gigajoules)	Combustibles de madera (por ciento sobre el total) d/ %
Mundo	4 708	1 666	0.37	14 720	256 594	5.4
Mundo desarrollado	1 147	145	0.13	1 363	205 115	0.7
Economías de mercado	775	54	0.07	506	145 148	0.3
Economía central planificada	372	91	0.24	855	59 967	1.4
Mundo en desarrollo	3 511	1 421	0.46	13 357	51 479	20.6
África	415	353	0.85	3 318	2 415	57.9
de sus países menos desarrollados	138	163	1.18	1 532	255	85.7
Asia	2 347	796	0.34	7 478	37 558	16.6
de sus países menos desarrollados	130	34	0.26	319	180	63.9
economía central planificada	1 010	220	0.22	2 068	24 048	7.9
Latinoamérica	365	277	0.78	2 557	11 306	18.4
de sus países menos desarrollados						

a/ Incluye la madera para cartón vegetal

b/  $1 \text{ m}^3 = 9.4 \times 10^9 \text{ joules} = 9.4 \text{ gigajoules}$

c/  $1 \text{ TNE} = 29.3 \times 10^9 \text{ joules} = 29.3 \text{ gigajoules}$

d/ No incluye otras fuentes de energía no comercial que son importantes en algunas regiones

Fuente: Report of the Technical Panel on Fuelwood and Charcoal. O.N.U. (1981).

Por lo que toca a los países subdesarrollados, estos recursos representan aproximadamente una quinta parte (20%) del consumo de energía, con grandes variaciones entre los países. En el grupo de los países menos desarrollados, la madera y el carbón vegetal representan con mucho la principal fuente de energía, estimándose su valor en cuatro quintas partes (80%) del consumo total. Esta cifra llega hasta 90% en algunos países de Africa, donde el consumo de estos recursos, con fines energéticos, representa el 58% del consumo total.

En algunos países de Latinoamérica, como Brasil y Argentina, esta cifra resulta también más alta que el promedio Latinoamericano, debido a su utilización en gran escala en diversos procesos industriales.

En los países en vías de desarrollo, el consumo de madera y carbón vegetal, para fines energéticos, representa el 85% del uso total de los mismos. En algunos países como la India y Pakistán, su consumo, sumado al de residuos agrícolas y al del estiércol, que representan aproximadamente la misma proporción que los primeros, contribuyen con casi el 50% del suministro total de energía.

Por lo que respecta a México, se estima que el consumo de madera y carbón vegetal anda por el orden de entre el 9 y el 13% del consumo total de energía primaria.

La madera presenta algunas ventajas con respecto a otras - fuentes de energía, como son su bajo costo, y que es un sistema des- centralizado para la captura y el almacenamiento de la energía solar. Además, tanto la madera como el carbón vegetal, a diferencia de otras fuentes de energía, pueden ser utilizados sin necesidad de equipos ca- ros o complejos, y sin ningún costo extra que el de la labor de reco- lección y preparación. Lo único que se necesita para su producción son tierras y trabajo.

La citada Conferencia Mundial, propone 6 programas de ac- ción con el fin de mejorar radicalmente la situación mundial de es- tos recursos, dichos programas son: <sup>\*\*</sup>

- Intensificación de la productividad de los recursos madereros -- existentes.
- Creación de nuevos recursos madereros.
- Organización de la distribución de la madera.
- Mejorar las tecnologías de conversión.
- Utilización de estufas más eficientes para el quemado de la made- ra y el carbón vegetal.
- Substitución de posibilidades por otras fuentes nuevas y renova- bles de energía.

\*\* Otros puntos importantes son la reforestación y el adecuado con- trol de los incendios y el pastoreo.

II.2) No Convencionales.

Como fuentes no convencionales se entenderán aquellas que no han desarrollado su tecnología completamente; que todavía se encuentran contempladas a nivel teórico únicamente; o cuya explotación no resulta competitiva por el momento, desde el punto de vista económico. Al igual que las fuentes convencionales, se han dividido en renovables y no renovables, en base a su temporalidad.

## II.2.1) No Renovables.

Dentro de este grupo quedan incluidos los siguientes recursos:

- a) Hidrocarburos no convencionales.
- b) Carbón no convencional (Turba).
- c) Combustibles nucleares fisiónables No Convencionales.\*\*

\*\* Al igual que el caso de los convencionales, conviene hacer notar que en los procesos nucleares no se efectúa una combustión, sino un fisión.

a) Hidrocarburos No Convencionales.

Dentro de este nombre genérico se incluyen los siguientes recursos:

- i) Petróleo No Convencional.\*\*
- ii) Gas No Convencional.

1) Petróleo No Convencional.

A continuación se hace un bosquejo y análisis muy breve de los recursos incluidos dentro de este grupo.

Recuperación Mejorada: La recuperación mejorada o terciaria, es aquella recuperación de petróleo de yacimientos petrolíferos adicional a la recuperación que puede obtenerse económicamente por los métodos convencionales de recuperación primaria (debida a la energía contenida naturalmente en el yacimiento) y de recuperación secundaria (que se logra manteniendo la presión del yacimiento mediante la inyección de gas o de agua).

Esta recuperación consiste en tres métodos básicos, que son: métodos térmicos; inyección de solventes; e inyección de agua con sustancias que facilitan el desplazamiento del petróleo.

\*\* Dentro de este concepto se incluyen una serie de productos, aún y cuando no todos son petróleo en el sentido estricto de la palabra, sino derivados del mismo y otro tipo de hidrocarburos que pueden substituir al petróleo convencional.

Los métodos térmicos se usan en yacimientos petrolíferos de alta viscosidad, e incluyen 2 tipos de técnicas; la inyección de vapor de agua y la combustión parcial del petróleo "in situ".

Los otros métodos de recuperación mejorada se aplican a yacimientos con petróleo de viscosidad relativamente baja, e incluyen básicamente:

- Inyección de  $CO_2$ , cuando se dispone de dióxido de carbono en grandes cantidades, y las propiedades del yacimiento cumplen con ciertas condiciones.

- Inyección de agua con productos químicos, los cuales pueden ser surfactantes\*\* con el fin de reducir la tensión superficial, o polímeros para aumentar la viscosidad del agua.

Se estima que utilizando recuperación mejorada en los yacimientos petrolíferos, se podrá elevar la cantidad de petróleo recuperado de los mismos, del promedio actual que oscila de un 25 a un 30%, a un porcentaje de recuperación del 45 al 50%.

De ahí que se le considere a la recuperación mejorada como un recurso no convencional de petróleo, ya que permitiría aumentar de manera considerable las reservas mundiales del mismo, aunque ello dependerá también de sus costos.

\*\* Los productos surfactantes son aquellos que en disolución acuosa, se hallan más concentrados en la superficie de contacto con una sustancia no miscible que en la masa del disolvente

Petróleo en mares profundos y zonas árticas: Los recursos petroleros bajo mares profundos (más de 200 m de tirante de agua) y de zonas árticas se estiman en unas 40 GT (1 GT =  $10^9$  ton). Aunque muchos expertos consideran que este debe ser un valor considerablemente mayor debido al prácticamente total desconocimiento del interior de los mares muy profundos.\*\* Por otro lado las dificultades de explotación no permitirán que resulten costeables a menos que los precios del petróleo convencional sean altos. Ello sin tomar en cuenta que no existe en la actualidad la suficiente técnica para aprovechar de una manera positiva dichos recursos.

Petróleo derivado del carbón: Actualmente están en experimentación ciertos procedimientos que, utilizando solventes en presencia de hidrógeno, se esperaba permitieran obtener una tonelada de petróleo --bruto equivalente por cada dos toneladas de carbón\*\*\*, a precios competitivos desde el punto de vista económico, siempre y cuando se pudiera disponer de carbón barato. Sin embargo no se ha logrado lo esperado, ya que aunque se ha demostrado la factibilidad técnica del procedimiento, no se ha logrado obtener una competitividad económica.

\*\* La Conferencia Mundial de Energía celebrada en Estambul en 1977 estimó que el petróleo de mares profundos y zonas árticas debe andar por el orden de  $129 \times 10^9$  TEC.

\*\*\* Esto depende mucho del tipo de carbón que se utiliza, ya que para el carbón no se puede hablar de factores únicos de conversión debido a que difieren mucho en composición y características de una cuenca a otra.

Combustibles de origen vegetal: De hecho este tipo de combustible - constituye un recurso renovable debido a la posibilidad de generar - los de manera continua, manteniendo adecuadamente su respectivo ciclo de producción agrícola. Para mayor información a este respecto consultar el tema correspondiente a biomasa, donde se tratará de una manera más amplia.

Arenas Bituminosas: Estas arenas son conocidas también, en algunas - regiones del mundo, como arenas asfálticas o arenas alquitranadas.

No existe una definición estandarizada de este tipo de recursos, pero en este trabajo se entenderá dentro de los mismos cualquier material constituido por arenas, areniscas, calizas o cualquier otra roca sedimentaria que contenga petróleo con una viscosidad mayor a 10,000 centipoises\*\* en sus condiciones naturales bajo tierra.

Este petróleo "in situ" tiene una movilidad muy baja, por lo que no se podría realizar con el ningún tipo de producción primaria significativa, bajo los métodos tradicionales de explotación.

Su densidad promedio es de 1 gr/cm<sup>3</sup> o más, lo cual equivale aproximadamente, a una densidad de 10 °API o menos.

Las arenas bituminosas difieren de otro tipo de materiales que contienen hidrocarburos, como las lutitas bituminosas, en el hecho de que la materia orgánica contenida en ellas es soluble en los solventes orgánicos; y en que, los hidrocarburos que contienen emigran de la verdadera roca madre productora\*\*\*.

Estas arenas difieren de los petróleos pesados en la falta de fluidez del hidrocarburo, aunque muchos petróleos tradicionalmente considerados como pesados, como los de la franja del Orinoco en Venezuela, pueden incluirse dentro de este tipo de recursos atendiendo a la definición que se haga de los mismos, particularmente en lo que respecta a su densidad\*\*\*\*.

\*\* Unidad de medida de la viscosidad dinámica en el Sistema C.G.S.

\*\*\* Información proporcionada al autor por el M.C. Jorge Ibarra Maycotte durante entrevista personal.

\*\*\*\* Final Report of the Technical Panel on Oil Shale and Tar Sands. O.N.U. (1981).

Al parecer los hidrocarburos pesados existen fundamentalmente en los carbonatos paleozoicos, y aunque no existe una evaluación precisa de su extensión, es probable que al menos sea tan grande como la de las arenas bituminosas.\*\*

Los depósitos más grandes de arenas bituminosas tienen un factor en común, que es su ocurrencia en deltas o medios ambientes muy cercanos a las costas. Siendo otro rasgo significativo, común a muchos depósitos, la presencia de una cumbre regional rocosa.\*\*\*

Por otra parte, la mayor parte de estos grandes depósitos de arenas bituminosas se encuentran en rocas del cretácico y del terciario, encontrándose el 90% de los más grandes de ellos en rocas de la Edad Cretácica, y más jóvenes. Consultar la tabla 1.16 donde se muestran las eras geológicas de la Tierra.

\*\* Final Report of the Technical Panel on Oil Shales and Tar Sands. ONU. (1981).

\*\*\* Idem al anterior.

La utilización de este tipo de recurso no es algo nuevo en el mundo, ya que desde mucho tiempo atrás se utilizaban para el calafateado<sup>na</sup> de los botes en el antiguo Egipto. Hace 200 años, los co merciantes de pieles canadienses, reportaban ya su uso por parte de los nativos de la región, para sellar sus canoas. Adicionalmente se les ha utilizado desde hace ya más de 100 años, en Europa y Norteamérica en la pavimentación de caminos.

El total de las reservas mundiales de estos recursos, no se encuentra bien delimitado todavía, aunque la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Fuentes de Energía Nuevas y Renovables celebrada en 1981, estima que deben ser de al menos 1 a 1.5 veces más grandes que el total de las reservas mundiales de petróleo convencional.

Actualmente se tienen identificados de manera somera 300 GT, de las cuales se considera que solo 56 GT, son explotables bajo las actuales condiciones.

\*\* Calafateado: tapado con estopa y breá o alguna substancia betunosa, de las juntas del forro de los barcos para que no dejen pasar el agua.

TABLA I.16) ERAS GEOLÓGICAS DE LA TIERRA.

ERA	SISTEMA	PERIODO	EDAD (millones de años)	
CENOZOICA	CUATERNARIO	Holoceno	0.01	
		Pleistoceno	2	
	TERCIARIO	Plioceno	5	
		Mioceno	24	
		Oligoceno	37	
		Eoceno	54	
MESOZOICA		Paleoceno	65	
		Cretácico	138	
		Jurásico	195	
		Triásico	230	
PALEOZOICA		Pérmico	290	
		Carbonífero	320	
		Devónico	Pensilvánico	350
			Misisípico	405
		Silúrico	435	
		Ordovícico	485	
	Cámbrico	590		
	Precámbrico	más de 590		

Fuente: The American Ass. Of Petroleum Geologists, Studies in Geology.  
No. 6 (1978).

Uno de los principales problemas para la explotación de este tipo de recurso estriba en que la mayoría de los grandes depósitos conocidos en el mundo, se encuentran en zonas aisladas, lo cual representa un incremento económico a la hora de realizar la explotación y transporte.

Los mayores depósitos del mundo de arenas bituminosas se encuentran en la Provincia de Alberta en Canadá, con reservas "in situ" de 157 GT, realizándose ahí una explotación comercial de 175 000 barriles diarios\*\*.

Otros depósitos importantes, son los de la franja del Orinoco en el este de Venezuela, que a pesar de no estar todavía muy bien cuantificados, se estiman entre 150 y 450 GT.

Siendo menores, no dejan de ser importantes los depósitos de la URSS, en la región del Volga/Ural, con 27 GT; los de los Estados Unidos en la región de Utah con 6 GT; y numerosos depósitos más en varios países del mundo entre los que se cuentan Albania, Angola, Argentina, - Bhután, Ecuador, Francia, Alemania Federal, India, Indonesia, Irán, - Italia, Iraq, Madagascar, Nigeria, Rumania y Senegal.

\*\* Desde luego la competitividad de las arenas bituminosas dependerá significativamente de los precios internacionales de los hidrocarburos.

Esto da una muy buena idea de la distribución tan amplia que tienen estos recursos, y de la importancia que podrían tener a futuro.

Para poder aprovechar los hidrocarburos pesados contenidos en las arenas, estos deberán separarse o extraerse de la roca almacenadora, o de las arenas que los contienen. Estas rocas son porosas y -- por lo general permeables, y son precisamente dichos poros los que contienen los hidrocarburos. Los cuales por su parte se encuentran inmóviles dentro de los mismos.

Por lo tanto, y dado que tanto las rocas porosas almacenadoras como las arenas poco consolidadas son inertes, estas deberán calentarse para poder destilarlas y aprovechar su contenido de hidrocarburos.

Una de las características de estos hidrocarburos pesados, -- estriba en que son solubles en algunos solventes orgánicos, además de ser combustibles. Por otra parte, su viscosidad disminuye normalmente de una manera marcada, con el incremento de la temperatura.

Las arenas bituminosas se pueden aprovechar de 2 maneras básicas: Recuperación a cielo abierto, que es la más económica y fácil, además de la única que se realiza en la actualidad; y la recuperación "in situ", que es aplicable únicamente dentro de ciertos límites en lo que respecta a la profundidad y espesor del yacimiento y a la forma--ción de ciertas propiedades como porosidad, permeabilidad y propiedades particulares de los hidrocarburos contenidos en las citadas arenas.

Independientemente de la manera en que se recuperen dichas -- arenas, una de sus ventajas se encuentra en su potencial aprovechamiento en la producción de energía térmica, ya sea por combustión directa o por la producción de hidrocarburos gaseosos, que pueden utilizarse -- posteriormente para producir dicha energía.

Los hidrocarburos pesados extraídos de las arenas bituminosas, tienen una aceptación limitada para convertirse por medio de su refinamiento en algunos de los combustibles ligeros líquidos de mayor demanda en la actualidad (debido a que dejan una gran cantidad de residuos).

Esta descomposición se puede llevar a cabo por medio de un método térmico (actualmente en desuso), o por craqueos o desintegraciones catalíticas o por hidrógeno.

La nafta y las gasolinas que resultan de estos craqueos, - son mezclados generalmente para formar petróleo crudo sintético (que únicamente resulta competitivo a gran escala), el cual tiende a tener una composición más alta de destilados medios y algo menor de gasolinas, que la del petróleo crudo natural. Los residuos se remueven y se convierten en combustibles de proceso, debido a su alto contenido de azufre, que los hace prácticamente inservibles para otros usos.

Los hidrocarburos pesados obtenidos de las arenas bituminosas, tienen también otros usos directos como combustibles pesados y - en usos relacionados con los asfaltos. Pueden obtenerse también como subproductos, azufre, y probablemente silicatos y coque.\*\*

Se calcula que a finales del siglo XX las arenas bituminosas producirán un millón de barriles de petróleo diarios.\*\*\*

\*\* Coque: El coque de petróleo es una materia a base de carbono, - porosa, de color negruzco, de densidad igual a 1.2, subproducto del - craqueo. Se utiliza en la fabricación de electrodos, abrasivos, grafito artificial, pigmentos, etc., y no debe confundirse con el coque de carbón.

\*\*\* Cosmos. Gran Atlas Salvat  
Los Recursos Naturales, Tomo IV, pag 72  
Editorial Salvat, España 1984.

Lutitas Bituminosas: En este trabajo se definirán como lutitas bituminosas a las rocas sedimentarias que contienen en estado sólido materia orgánica combustible dentro de una matriz mineral. Esta materia orgánica se encuentra constituida por kerógeno (que es insoluble en los solventes orgánicos neutros); bituminoides (que si son solubles en los solventes orgánicos neutros); y ácidos húmicos.

El combustible que se obtiene de las lutitas bituminosas se asemeja, pero no es igual, al petróleo crudo.

Existen otras rocas de estructura semejante a las lutitas, pero de origen y características diferentes, que también pueden contener kerógeno, como los esquistos (rocas metamórficas) y las pizarras (rocas de metamorfismo menor), y que suelen incluirse dentro de la clasificación antes señalada.\*\*

Es por ello que existen muchos nombres para este tipo de recurso en todo el mundo, algunos de ellos tan localistas que solo se utilizan en regiones muy pequeñas, entre ellos se tienen: Esquistos bituminosos, pizarras bituminosas, pizarras petrolíferas o aceitosas, lutitas petrolíferas o aceitosas, lutitas algíferas, lutitas negras, lutitas gaseosas, lutitas kerógenas, kerosina lutítica, lutita carbonácea, lutita carbonosa, kukersita, lutita lignítica, lutita orgánica, carbón cannel, lutita cannel, estelartasmanita, torbanita, maharahu, corongita, etc.\*\*\*

\*\* DE GALIANA, Minot Tomás De.  
Pequeño Larousse Técnico.  
Ed. Larousse, 1976.

\*\*\* Aunque la producción de aceite puede ser muy variable de una a otra.

Los depósitos de lutitas bituminosas se litifican\*\* indistintamente a partir de los sedimentos marinos o lacustres que sean relativamente ricos en materia orgánica (aunque con rendimientos diferentes de aceite y gas).

Las lutitas bituminosas suelen estar formadas generalmente por sólidos no porosos, de grano fino, y se encuentran frecuentemente en yacimientos expuestos. La materia orgánica y mineral están íntimamente mezcladas en este tipo de roca, siendo el material mineral la mayor parte de la misma, mientras que la materia orgánica representa generalmente menos del 15% en peso.

Es probable que los minerales contenidos en las lutitas bituminosas se hayan formado en los sedimentos, a través de procesos químicos debidos a la presencia de materia orgánica.

En prácticamente todos los depósitos de lutitas bituminosas aparece el cuarzo, la ilita y la pirita, soliendo encontrar también feldespatos y otras arcillas. Muchos de ellos contienen carbonatos, minerales, y algunos, grandes cantidades de dolomita y calcita.

Una de las principales razones técnicas para el desarrollo particular de estos recursos, atendiendo al lugar en que se encuentran, se debe a las características de la matriz mineral dentro de los depósitos, las cuales pueden variar en gran medida con la estratigrafía del depósito, y en menor grado con la extensión lineal.

\*\* De Litificación: Formación de rocas, especialmente a partir de sedimentos.

Las características de la materia orgánica contenida dentro de los depósitos suelen ser muy uniformes, sin embargo su composición varía de depósito en depósito, y está influenciada por las condiciones de depositación y la naturaleza de los desechos orgánicos.

De ahí que al tratar de recuperar el kerógeno deberá tenerse muy en cuenta la proporción de carbono con respecto al hidrógeno, ya que la fracción de kerógeno que es susceptible de convertirse en petróleo se incrementa conforme la proporción carbono-hidrógeno decrece. Así, un depósito con una proporción de carbono-hidrógeno de 7.8 produce el 69% de su carbono orgánico como petróleo, mientras que otro con una proporción de 12.8 solo produce un 13%. Adicionalmente, el kerógeno contiene cantidades variables de azufre, oxígeno y nitrógeno, cuya concentración afecta también la cantidad de carbono orgánico susceptible de recuperarse como petróleo.

Las lutitas bituminosas se utilizan en el mundo en pequeña escala desde hace más de 150 años, la razón de que no se hayan usado en una escala mayor se debe a que no pueden competir con los precios, más bajos, del petróleo. Sin embargo, si estos precios sufrieran alzas considerables, la competitividad de las lutitas se vería mejorada substancialmente. Desde entonces se han establecido industrias en Australia, China, Francia, la República Federal Alemana, Escoia, Sudáfrica, España, Suecia, Brasil y la URSS.

En la tabla I.17 se muestran los recursos de lutitas bituminosas que han sido particularmente analizados y mapeados. Esta tabla únicamente da órdenes de magnitud de la potencialidad de los mismos en los depósitos conocidos, sin embargo estas cifras no deben considerarse como la base final de los recursos, ya que existen muchos países que no han efectuado exploraciones tendientes a cuantificar sus recursos de lutitas bituminosas. Aún más, la cantidad de recursos considerados como recuperables bajo las actuales condiciones depende mucho del criterio que se utilice.

La Conferencia Mundial de Energía (Estambul, 1977), por ejemplo, evaluó en  $43 \times 10^9$  ton las reservas de lutitas bituminosas recuperables, lo que equivale a aproximadamente el 5% del potencial-energético mundial de combustibles fósiles.\*\*

En base a la cantidad de rocas sedimentarias existentes en el mundo y a su contenido orgánico, se ha estimado la cantidad de depósitos de lutitas bituminosas no descubiertas o detectadas hasta el momento, aunque se sabe que dicha cantidad puede ser cuando mucho -- del doble de grande que el potencial de los depósitos conocidos.\*\*\*

\*\* ALPERN, Boris.

Les Schistes Bitumineux: Constitution, Réserves, Valorisation. Bull Centres Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine. Pau, 30 novembre 1981.

\*\*\* Final Report of the Technical Panel on Oil Shales and Tar Sands. ONU. (1981).

TABLA I.17) RECURSOS MUNDIALES DE LUTITAS BITUMINOSAS. a/  
 (10<sup>9</sup> ton)

Area	Recursos estimados en los depósitos conocidos.	Recursos en los depósitos conocidos probablemente recuperables bajo las actuales condiciones.
Africa	14	1.5
Asia	15	3.5
Australia y Nva. Zelanda.	3.1 b/	---
Europa	11	4.0
América del Norte	320	12.0
América del Sur	115	7.0
T O T A L	475	29.0

a/ Recursos que proporcionan más de 40 litros de "kerógeno" por cada tonelada de lutitas bituminosas.  
 Factor de conversión usado: 1 tonelada = 1.1 m<sup>3</sup> (valores redondeados)

b/ El anuncio de recientes descubrimientos de lutitas bituminosas en el depósito circular de Australia, indica que los recursos australianos pueden ser substancialmente más grandes que los indicados.

Fuente: Final Report of the Technical Panel on Oil Shales and Tar Sands. ONU. (1981).

Los depósitos de estos recursos se encuentran distribuidos de manera muy amplia en el mundo, habiéndose detectado ya muchos de los depósitos exteriores, aunque los depósitos bajo tierra deberán de tectarse mediante perforación.

Los Estados Unidos tienen cerca de las dos terceras partes de los recursos conocidos de lutitas bituminosas, y cuentan con un -- programa que pretende producir cerca de 20 millones de ton/año para 1987 y alrededor de 50 millones de ton/año para 1992. Para ello se utilizará la tecnología más avanzada dentro del área, ya que este -- país es el más adelantado y el único que realiza investigación en lo que respecta a la explotación "in situ" de estos recursos. A pesar de ello, la producción de cerca de 1 millón de toneladas por año, satisfecerá menos del 4% de la demanda esperada de petróleo de los Estados Unidos para los años 90.

En China, la industria de lutitas bituminosas ha operado por cerca de 50 años. Estas se obtienen como un subproducto de la explotación superficial del carbón, teniendo una producción anual de cerca de 300,000 ton., obteniéndose también sulfato de amonio como subproducto. Se encuentra además en estudio el posible aprovechamiento de las cenizas residuales, producto de la obtención de los hidrocarburos contenidos en dichas lutitas, para la industria del cemento, lo que haría más competitiva a esta fuente de energía.

Por su parte Brasil cuenta con la mayor planta piloto del -- mundo, con una producción anual de 50,000 ton., mientras que Australia cuenta entre sus planes con la instalación de una planta comercial a base de estos recursos. En lo referente a los depósitos mundiales más explorados y estudiados estos son los de las áreas de Leningrado y Estonia en la URSS, y los de la formación de Río Verde en E.U.A.

Para poder obtener los hidrocarburos (kerógeno) contenidos en las lutitas bituminosas, se necesita calentar la roca hasta una temperatura de aproximadamente 500° C, la pirólisis\*\* del kerógeno que se lleva a cabo durante el calentamiento es llamada generalmente destilación en retorta.

La explotación de estos recursos, se puede realizar de las siguientes maneras:

- Producción en gran escala de petróleo crudo sintético: Para ello, las lutitas bituminosas se pueden explotar de dos maneras básicas, la primera de ellas consiste en la destilación en retorta, en la cual se obtiene el kerógeno contenido en las lutitas bituminosas por medio de su calentamiento en retortas\*\*\* en donde además se requiere que dichas lutitas se obtengan del tamaño adecuado para las retortas, lo cual obliga a que después de su explotación en las minas, se les tenga que moler y posteriormente tamizar\*\*\*\*. La segunda consiste en la destilación en retorta "in situ", en la cual no se necesita excavar en todo el depósito, sino solo en una parte de él, aunque a la fecha, este procedimiento se realiza solo en E.U.A., y no se espera que su producción pueda ser significativa hasta en por lo menos 20 años.

\*\* Pirólisis: Descomposición térmica de materiales carbónicos, en ausencia de oxígeno.

\*\*\* Retorta: Vasiija de laboratorio químico que tiene el cuello muy largo y vuelto hacia abajo, y que sirve sobre todo para destilar

\*\*\*\* Tamiz: Cudazo de mallas tupidas, a través del cual se hacen pasar materias generalmente granulosas, a fin de separar los granos finos de los más gruesos.

Marruecos cuenta con planes para la construcción de una -- planta de 1000 MW, la cual funcionará con las lutitas superficiales existentes ahí, y se espera que para 1990 se satisficrán el 50% de sus necesidades totales de energía con este tipo de recursos.

- Producción en pequeña escala de combustibles líquidos, para consu mo local: Este tipo de producción es especialmente interesante para los países en vía de desarrollo, sobre todo cuando se trata de fines de cocina, calefacción y alumbrado. Dado que la tecnología y los -- elementos necesarios para ello, se encuentran en prácticamente cual-- quier país dentro de la categoría anterior.

La obtención de subproductos podría contribuir a hacer más compe-- titiva la explotación de estos recursos, entre los cuales se tiene la obtención de gas de la destilación; amoniaco, azufre y/o sulfatos de amonio del proceso de craqueo. Es probable también la recuperación de minerales valiosos, y la utilización de las cenizas, resultado del proceso, en la industria cementera. Siendo una posibilidad adicional la producción de petroquímicos.

De acuerdo con la encuesta realizada por la XI Conferencia - Mundial de Energía, las reservas probadas de arenas y lutitas bituminó sas ascienden a 86 GT.

La misma encuesta estima que para el año 2020, el llamado -- "petróleo" no convencional contribuirá con una producción de entre el 10 y 25% del suministro mundial de petróleo.

Por lo que respecta a México, prácticamente no existen informes respecto a la existencia de lutitas bituminosas, aunque en un estudio hecho por la CFE\*\*, se determinaron 4 áreas que reúnen condiciones geológicas favorables para la existencia de lutitas bituminosas, en el norte de México, estas son las cuencas de:

- 1.- Fuentes-Río Escondido.
- 2.- Burgos (sub-cuenca de Colombia-San Ignacio)
- 3.- Tampico-Misantla
- 4.- Chicontepoc.

Habría que hacer estudios más profundos y en toda la república para poder determinar la potencialidad en México de esta fuente.

\*\* Programa Preliminar de Exploración de Lutitas Bituminosas en el Norte de México para la Generación de Electricidad. Superintendencia de Estudios Carboníferos, CFE. 1981.

ii) Gas No Convencional.

Dentro de este grupo se incluyen los siguientes recursos:

Yacimientos Geopresurizados: Se trata de depósitos subterráneos de agua caliente a alta presión, que contienen metano disuelto. Para mayor información al respecto consultar el capítulo III.5 correspondiente a Otros Sistemas Geotérmicos, donde se amplía la información.

Gas Obtenido del Carbón: La tecnología necesaria para la obtención de este recurso se encuentra ya desarrollada desde hace más de 50 --- años; sin embargo, su utilización no se ha dado en el plano comercial, debido a sus costos substancialmente más altos que los de la obtención del gas natural de los campos petrolíferos y de gas. Su utilización podría ser una alternativa más para el futuro.

Gas de Origen Vegetal: Si bien este recurso se ha colocado aquí por quedar incluido dentro de la definición de gas no convencional, hay --- que aclarar que en realidad se trata, al igual que en el caso del petr---óleo de origen vegetal, de un recurso renovable. Para mayor información al respecto consultar la parte correspondiente a recursos de ---biomasa no convencional.

Gases Congelados: Se conoce muy poco de este recurso, aunque se han descubierto algunos yacimientos de gases helados en forma de hidratos en el norte de la URSS, no descartándose la posibilidad de la existen---cia de otros en regiones como el Artico, Antártida, Siberia, etc.

Gas de la Arenas y lutitas Bituminosas: Como se vió en las partes correspondientes a estos temas, es posible obtener de dichos recursos cantidades importantes de gas, sin embargo, hasta ahora la prioridad se le ha dado a la obtención de hidrocarburos líquidos de los mismos. Queda pues esta posibilidad como una más en el intento de diversificación a futuro de las fuentes de energía. Para mayor información a este respecto, consultar la parte correspondiente a -- arenas y lutitas bituminosas.

Gas a partir de la turba: Actualmente se encuentran en estudio -- ciertos procesos para la gasificación de la turba, para mayor información al respecto consultar la parte correspondiente a turba.

Por lo que toca a México, no existe prácticamente ninguna investigación ni informes sobre los recursos de gas no convencionales.

b) Carbón No Convencional (Turba).

La turba es una mezcla heterogénea de materia orgánica (material vegetal) en descomposición parcial y minerales inorgánicos -- que se han acumulado en un medio saturado de agua. Su color puede variar del amarillo al negro parduzco, según el grado de descomposición biológica y desintegración mecánica de las fibras vegetales y -- la presencia de sedimentos. Un medio saturado de agua impide la -- completa descomposición biológica activa del material vegetal y promueve la retención del carbón que normalmente quedaría en libertad -- en forma de productos gaseosos, como consecuencia de la actividad -- biológica.

En términos geológicos, se considera a la turba como un -- carbón de formación reciente, es decir, es el proceso anterior a la formación del lignito (consultar figura I.13).

La formación de la turba se produce entre otros, en pantanos, ciénegas y marismas de agua dulce y salada que se encuentran en todas las partes del mundo. Este proceso de formación es sumamente lento, además de que se detiene una vez que se comienza la explotación de la turba para combustible. Se ha calculado que la formación de turba en Europa se ha realizado en un proceso formativo de -- 20 a 80 cms. cada mil años, por lo tanto para efectos prácticos, la turba no puede considerarse como una fuente renovable de energía, pero si como una fuente alterna.

Por otra parte, el proceso de formación varía considerablemente de una turbera a otra, estas variaciones de dependen sobre todo al clima y a la vegetación. Se cree que de todos los vegetales, el musgo esfago es el que probablemente forma la turba más rápidamente.

Los depósitos de turba están situados en la superficie y por ellos es fácil localizarlos y analizar su calidad.

Pero el mayor problema en la utilización de la turba, estriba en la disminución de su alto contenido natural de humedad, el cual llega a un 95%. Una vez que se han drenado las ciénegas turberas, -- queda todavía un contenido de humedad del 70 al 80%, pero para que la turba pueda utilizarse como combustible el contenido de humedad debe reducirse al 55% o menos, llegando incluso al 10% según los métodos de producción y elaboración que se apliquen. Sin embargo, para secar -- una turbera con fines de producción, hacen falta normalmente entre 2 y 6 años, dependiendo esto, sobre todo, de la calidad de la turba. Por lo que respecta a su valor calorífico; este varía entre 8 y 18 megajoules por kilogramo (MJ/Kg), dependiendo de la forma en que se produce.

Además de su contenido de humedad, existen otras características importantes que afectan su capacidad de conversión en energía, y que son: Su densidad en masa, contenido de ceniza, composición química y valor calorífico en sustancia seca.

La turba para combustible se produce actualmente en cuatro formas básicas, según sea el método de producción y el tipo de utilización:

- Turba en capas: Es una mezcla heterogénea de pequeñas partículas sueltas de turba que han sido cortadas mecánicamente de la superficie de la turbera. La profundidad del corte es de alrededor de 2 cm. por vez, y el tamaño medio de las partículas es de 3 a 8 mm.

- Turba en Tepe: Es un producto cortado mecánicamente y comprimido para combustible. Esta compresión se realiza únicamente durante la producción. Las formas pueden ser cilíndricas, con diámetros de 5 a 10 cm y largo de 10 a 30 cm, o cúbicas. Además los tepes se encogen y endurecen aún más durante el secado por aire.
- Briquetas o pelladas de turba: Generalmente se hacen de turba extraída en capas, que se seca térmicamente hasta alcanzar un contenido de humedad del 10 al 20% y luego se comprimen para formar las briquetas. Su tamaño y forma son similares al de un ladrillo común.
- Turba cortada a mano: Son generalmente de forma cúbica y miden 10-20 X 20 X 30 cm.

En la tabla I.18 se muestran las características y utilización de las 4 formas anteriores.

TABLA I.18) Características y utilización de la turba para combustible

Tipo de turba	Valor calorífico recibido (megajulios por kilogramo)	Contenido de humedad promedio porcentaje	Densidad en masa (kilogramos por metro cúbico)	Utilización
Turba cortada a mano	11-15	25-40	200-400	Para cocinar en las casas, calefacción
Turba extraída en tepes	11-14	30-40	300-400	Utilización comercial moderada y reducida, uso doméstico
Turba extraída en capas	8-11	40-55	300-400	Grandes calderas, plantas de energía y plantas de calefacción
Briquetas de turba	17-18	15	700-800	Aplicación comercial moderada. En las casas para calefacción, para cocinar y para encender hogares

Fuente: Informe sobre la Utilización de la Turba para la Producción de Energía. O.N.U. (1981).

Los anteriores son los usos convencionales de la turba, sin embargo existen otros usos potenciales que se encuentran todavía en -- etapa de desarrollo e investigación, como son las nuevas técnicas de -- combustión que incluyen el secado instantáneo de la turba, la combustión centrífuga y la combustión de lecho fluidizado; la utilización -- en procesos industriales en industrias como la del ladrillo, cemento -- vidrio, etc; y la gasificación y licuefacción que son aplicables so-- bre todo en los casos en que no es posible la utilización o combustión directa de la turba. Otra utilización de la turba consiste en su utilización como sustrato y para muchos productos especiales como la hor-- ticultura, además puede ser también una fuente de fertilizantes, ya que es susceptible de extraerle compuestos como el amoníaco, muy utilizado como fertilizante.

La principal utilización actual de la turba es como combusti-- ble, y en las zonas remotas o en aquellas en las que exista escasez de madera para leña, su uso puede representar un potencial muy grande. Por otra parte puede suplantar a combustibles importados o escasos pa-- ra generar ya sea calor o electricidad y reemplazar a otros combusti-- bles en la industria.

De hecho en pequeña escala su principal utilización estriba en usos de cocina y calefacción y a gran escala en la producción de -- electricidad, en plantas que varían de unos cuantos KW hasta 600 MW.

Su viabilidad económica depende de condiciones locales como -- la disponibilidad de otros combustibles, los costos de mano de obra, ma-- teriales, transporte, las condiciones climáticas, etc.

Su precio para combustibles es considerablemente menor que el precio en el mercado del petróleo, gas natural o carbón.

Por lo que respecta a los recursos mundiales de turba, se estima que el total de turberas cubre 420 millones de hectáreas, aunque es posible que esta cifra pueda ser de por lo menos 500 millones, debido a la escasez de datos que al respecto se tiene, ya que solamente de Europa se tienen datos más o menos exactos. Las hectáreas estimadas de turberas representan aproximadamente  $400 \times 10^9$  toneladas de turba -- con un contenido de humedad del 40%, equivalentes a  $100 \times 10^9$  toneladas de petróleo. Energéticamente hablando, los recursos totales de turba representan el 50% de los recursos conocidos de gas natural.

Se sabe además que existen turberas en por lo menos 40 o 50 países en todo el mundo, siendo muy probable su existencia en otros.

Su distribución mundial es muy amplia, además de encontrarse en todos los continentes. En la figura I.18A aparecen las zonas de acumulación de turba, y en la tabla I.19 se muestra la estimación de la superficie total de turberas en diferentes países.

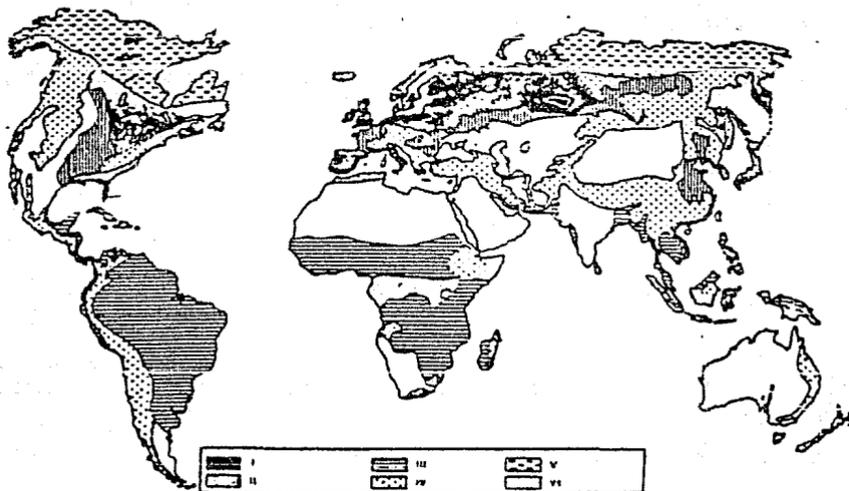
La turba se ha utilizado desde hace por lo menos 2000 años como combustible, mantillo\*\*, substrato para el suelo, medicina, material de construcción, etc. y en escala industrial se le utiliza desde antes de la Primera Guerra Mundial.

Su producción representa aproximadamente el 0.4% de la producción mundial de carburantes fósiles, y equivale aproximadamente a 25 millones de toneladas de petróleo.

Los principales usuarios son La Unión Soviética con aproximadamente el 89% de la producción mundial, Irlanda en la cual representa el 20% de sus reservas energéticas y Finlandia que produce de un 3 a un 4% de su energía total con este recurso.

\*\* mantillo: Materias orgánicas descompuestas, presentes en la tierra que forman la capa superficial del suelo.

FIGURA I.10A) Zonas de acumulación de turba



**Fuente:** Nikonov y Sluka, 1964.

**Nota:**

- I: zonas de formación intensiva de turba
- II: acumulaciones de turba de escasa intensidad de la zona templada
- III: acumulaciones de turba de escasa intensidad de los trópicos
- IV: acumulaciones de escasa intensidad de las regiones montañosas
- V: acumulaciones de escasa intensidad de las regiones árticas
- VI: depósitos de turba de volumen despreciable o inexistentes

TABLA I.19) Estimación actual de la superficie total (original) de turberas en diferentes países en 1980

(Superficie en millones de hectáreas con más de 30 cms. de turba)

País	Área	País	Área
Canadá	170	Etiopía	0.018
Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas	150	Australia	0.015
Estados Unidos de América	40	Rumanía	0.007
Indonesia	26	España	0.006
Finlandia	10,4	Grecia	0.005
Suecia	7,0	Israel	0.005
China	3,48	Bulgaria	0.001
Noruega	3,0	India	...
Malasia	2,36	Pakistán	...
Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte	1,58	Bolivia	...
Polonia	1,35	Botswana	...
Irlanda	1,18	Brazil	...
República Federal de Alemania	1,11	Burundi	...
Islandia	1,0	Chile	...
República Democrática de Alemania	0,550	Guinea	...
Cuba	0,450	India	...
Países Bajos	0,250	Costa de Marfil	...
Japón (Hokkaido)	0,200	Jamaica	...
Nueva Zelandia	0,150	Kenya	...
Dinamarca	0,120	Malawi	...
Italia	0,120	Mozambique	...
Hungría	0,100	República de Corea	...
Uruguay	0,100	Rwanda	...
Francia	0,090	Sri Lanka	...
Suiza	0,055	Sudán	...
Argentina	0,045	República Unida de Tanzania	...
Checoslovaquia	0,031	Viet Nam	...
Austria	0,022	Zaire	...
		Gambia	...
		Zimbabwe	...

Nota: Los puntos suspensivos (...) indican que no se dispone de datos.

Fuente: Informe sobre la Utilización de la Turba para la Producción de Energía. O.N.U. (1981).

Actualmente solo los países desarrollados hacen un uso importante de este recurso, pero se espera que a futuro constituirá una -- fuente muy importante a nivel mundial.

Se calcula que para el año 2000 se utilice el equivalente -- de 30 a 40 millones de toneladas de petróleo en los países desarrolla-- dos y de 10 a 20 millones de toneladas en los países en vía de desa-- rrollo, para un total mundial de 40 a 60 millones de toneladas de pe-- tróleo, aunque el potencial final es aún mayor.\*\*

Para el caso de México, no existen datos precisos sobre la existencia de turberas aunque se tiene conocimiento muy preliminar de la existencia de algunas en Parras, Coahuila; Sayula, Jalisco; Chalco, Estado de México. (Ver figura I.15), y en la cuenca Macuspana en los límites entre Tabasco y Veracruz.\*\*\*

\*\* Informe sobre la Utilización de la Turba para la Producción de -- Energía. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Fuentes de Energía Nue-- vas y Renovables. Nairobi, Kenya, 10-21 de agosto de 1981.

\*\*\* Información proporcionada al autor por el M.C. Jorge Ibarra Maycotte durante entrevista personal.

c) Combustibles Nucleares Fisionables: No Convencionales.

Dentro de este nombre se incluyen los siguientes recursos:

- i) Uranio No Convencional.
- ii) Torio.

1) Uranio No Convencional.

Este puede obtenerse básicamente de dos maneras; como producto principal o como subproducto.

Como Producto Principal: Se han hecho trabajos de investigación para recuperar el uranio, como un producto principal, de la roca fosfatada, las pizarras o esquistos negros marinos, ciertas formaciones graníticas con contenidos de uranio mayor del normal, algunos yacimientos de lignito y carbón, así como del agua de mar.

Aunque esto último está en estudio todavía y no se cree que puedan tener ninguna aplicación importante, a nivel mundial, -- hasta antes de mediados del próximo siglo, algunos países ya cuentan con avances importantes en algunos métodos, como Japón en la recuperación de uranio del agua de mar.

Marruecos cuenta con los mayores depósitos de roca fosfatada del mundo, con más de 6 millones de toneladas de uranio en dichos depósitos, y se espera que se comience con su producción comercial durante los años 90.\*\* Siria, Brasil, Chile y España cuentan también con importantes recursos de uranio en rocas fosfatadas.

Suecia y Corea han hecho algunos estudios importantes a fin de determinar el costo de obtención del uranio de las pizarras y esquistos marinos.

Como Subproducto: El uranio puede recuperarse como subproducto en algunas industrias como la de la producción de ácido fosfórico, en la lixiviación\*\*\* de ciertos minerales de cobre, y en la industria de minerales pesados.

Actualmente se obtienen cantidades significantes de uranio como subproducto, de la producción de ácido fosfórico de grandes depósitos de fosfatos marinos de los Estados Unidos, obteniéndose también uranio en Bélgica, con el mismo método, de fosfatos importados.

\*\* Uranium Resources, Production and Demand.  
OECD, Nuclear Energy Agency.  
International Atomic Energy Agency, December 1983.

\*\*\* Lixiviación: Operación consistente en hacer que un disolvente atravesase una capa de materia pulverulenta para extraer uno o varios constituyentes solubles de la misma. Esta operación se conoce también con el nombre de percolación.

Estados Unidos recupera uranio en la actualidad, como subproducto en la producción del cobre, y se espera que próximamente lo haga Chile también.

Sudáfrica recupera uranio como subproducto en la obtención del cobre y otros metales del complejo de carbonatita de Phala borwa. Brasil ha estimado recursos de uranio de 13,500 ton. en el complejo de carbonatita de Araxá.

Para el caso de México, como se mencionó anteriormente, la recuperación de uranio de la roca fosfórica deberá permitir alimentar una planta adicional de 1,200 MW en Laguna Verde, Veracruz.

En Baja California se han descubierto recientemente grandes cantidades de roca fosfórica, que se estima contengan cerca de 151,000 ton. de óxido de uranio ( $U_3O_8$ ), que pueden recuperarse en combinación con los programas nacionales para la producción de ácido fosfórico y fertilizantes, a fin de que resulte más económica la producción.

\*\* Uranium Resources, Production and Demand.  
OECD, Nuclear Energy Agency.  
International Atomic Energy Agency, December 1983.

\*\*\* Energéticos.  
Boletín Informativo del Sector Energético.  
Año 6, México, Mayo de 1982.

En Peña Blanca, Municipio de Villa Aldama, Chihuahua, existe la posibilidad de obtener uranio en un proyecto de beneficio-compartido, que reduciría consecuentemente los costos, ya que se han encontrado más de 10,000 ton. de sulfato.

Entre 1969 y 1971 se operó en Villa Aldama una pequeña planta piloto-industrial para la producción de molibdeno, de la que se obtuvieron como subproducto 47 ton. de óxido de uranio.\*\*

\*\* ESCOFET, Artigas Alberto; RODRIGUEZ, Soto Enrique; CASTILLO, Nicto Fernando.  
El Uranio En México.  
Programa Universitario de Energía. Julio de 1984.

ii) Torio.

El torio 232, que representa casi el 100% de los recursos naturales del mismo, es relativamente abundante en la naturaleza (aun que mucho más abundante que el uranio), y posee las características necesarias para constituir un recurso fisil suplementario para la -- producción de energía nuclear, ya que puede transformarse en uranio-fisil 233 por medio de la captura de un neutrón.

El torio puede producir temperaturas mucho más elevadas que el uranio, pero si llegara a utilizarse para generar electricidad, - debería modificarse todo el ciclo nuclear.

Los recursos mundiales razonablemente probados de torio, - recuperables a costos inferiores a 80 dólares por kilogramo de  $\text{ThO}_2$ , se estiman actualmente en alrededor de 700,000 ton. La mitad de -- esos recursos se encuentran en la mazonita de yacimientos de arcana-con minerales pesados, en las costas de la India.\*\* Casi todo el -- resto se encuentra en yacimientos similares en Brasil, Australia, - Malasia, y los Estados Unidos. Estos yacimientos costeros se ex-plotan actualmente debido a su alto contenido de minerales pesados (titanio, circonio, etc.) y de tierras raras.

No existe información sobre recursos de torio en México, - aunque si la hay para otros países de América Latina como Brasil y- Argentina.

\*\* VIQUEIRA, Landa Jacinto.  
Apuntes de la Materia Energía y Desarrollo Económico.  
Maestría en Ingeniería Energética, DEFFI, UNAM, 1985.

Resulta conveniente hacer la aclaración de que existen otros elementos radiactivos naturales, como el Potasio y el carbono-14, entre otros. De todos ellos el potasio es el más abundante y difundido, pero no se ha descubierto ninguna forma para poder utilizarlo en la generación de energía. Todos ellos representan, sin embargo, una potencial fuente de energía a futuro, en caso de que logre encontrarse un procedimiento técnico-económico adecuado para su explotación.\*\*

\*\* Lo cual parece ser que será muy difícil, debido a su bajo contenido energético.

## II.2.2) Renovables

Quizá sean estos los recursos con más potencialidad a futuro de todos los conocidos actualmente, sin embargo son también de -- los menos conocidos y estudiados, a pesar de que en los últimos años se han dedicado grandes esfuerzos a su desarrollo.

Entre estos recursos se deben mencionar en primer lugar -- dos que en caso de resolverse los problemas científicos y tecnológicos para hacer su utilización más eficiente y económica, podrían suministrar cantidades prácticamente ilimitadas de energía (atendiendo a las necesidades humanas actuales), estos son la energía solar y la energía de fusión nuclear.

Existen además otros recursos dentro de este grupo, que si bien tienen posibilidades más limitadas como fuentes de energía, podrían sin embargo, ser de gran ayuda en disminuir el consumo de combustibles fósiles, que son los que actualmente satisfacen la mayor parte de las necesidades mundiales de energía.

Lo más importante al final de cuentas, es que todos ellos son recursos renovables, y prácticamente no contaminantes, por lo -- que se hacen evidentes las múltiples ventajas que tienen sobre la mayoría de los recursos convencionales para la producción de energía. Por ello es vital proseguir con la investigación y desarrollo dentro de esta área, porque muy probablemente en ella se encuentra el futuro energético de la humanidad.

Dentro de este grupo se incluyen los siguientes recursos:

- d) Recursos Geotérmicos No Convencionales.
- e) Recursos de Biomasa No Convencional.
- f) Recursos Solares.
- g) Recursos Eólicos.
- h) Recursos Oceánicos.
- i) Recursos nucleares fusionables.

d) Recursos Geotérmicos No Convencionales.

Dentro de este grupo quedan incluidos los siguientes recursos: Energía geotérmica de rocas secas y calientes, energía geotérmica de zonas de alta presión o de geopresión, energía geotérmica de masas de magma y energía geotérmica submarina, los cuales se exponen de una manera más amplia en el capítulo III.5 correspondiente a otros sistemas geotérmicos.

e) Recursos de Biomasa No convencional.

Como biomasa no convencional se entenderá a cualquier producto biológico susceptible de convertirse en energía útil (incluyendo en este término los productos vegetales, animales y todo tipo de residuos orgánicos), excluyéndose la madera y carbón vegetal de los que anteriormente se ha hablado ya de una manera más extensa.

Se estima que en la actualidad la biomasa no convencional no representa ni siquiera el 1% del consumo mundial de energía, sin embargo su importancia a futuro puede ser muy grande.

La producción de biomasa de origen vegetal ocurre con ayuda de la energía solar a través de la fotosíntesis, en la que agua y bióxido de carbono de la atmósfera son transformados en materia orgánica y oxígeno. De hecho la biomasa consiste en un aprovechamiento indirecto de la energía solar.

La eficiencia de conversión de energía solar en energía almacenada en forma de materia orgánica (a través de la fotosíntesis) es muy baja, estimándose su límite máximo en 3%\*\*. Pero en la mayoría de las plantas esta cifra anda en un rango de valores entre 0.2 y 0.4, aunque algunas especies forestales de explotación comercial alcanzan eficiencias de conversión de hasta 1%.

La importancia de la eficiencia fotosintética radica en que determina la producción de biomasa por unidad de superficie y por lo tanto el máximo potencial energético del recurso.

Solo la parte visible del espectro solar (de aproximadamente un 45%) es aprovechable en la fotosíntesis. Un 20% de esta se pierde por reflectancia y absorción inactiva, lo que deja un 36% del total de la radiación solar incidente como energía disponible para las reacciones fotosintéticas primarias. Desde el punto de vista termodinámico, estas tienen una eficiencia máxima teórica del 25%. Así, la energía que es realmente aprovechada por las plantas apenas alcanza un 6% de la radiación solar incidente, de la cual todavía la mitad aproximadamente la utilizan ellas mismas en su respiración y metabolismo, quedando finalmente el 3% máximo mencionado anteriormente.

\*\* ALONSO, Concheiro Antonio; RODRIGUEZ, Viqueira Luis. Diagnóstico y Pronóstico sobre Energía Solar, Biomasa y Energía Eólica. Proyecto 2106 CONACYT - Instituto de Ingeniería, Tomo II, U.N.A.M. noviembre de 1982.

La cantidad de biomasa disponible en el mundo, es considerable, pero difícil de cuantificar con precisión, se estima que su producción anual sea del orden de entre  $140 \times 10^9$  y  $160 \times 10^9$  tcn, - siendo la más importante la correspondiente a la biomasa forestal - (ver el capítulo correspondiente a biomasa convencional). En la tabla I.20 publicada por la XI Conferencia Mundial de Energía en 1981, aparece la producción mundial anual de biomasa, donde se estima una producción anual de  $155 \times 10^9$  toneladas, con un contenido energético de  $798 \times 10^9$  MWt, de los cuales dos terceras partes se producen en los continentes y una tercera parte en el mar, ello a pesar de que la superficie productora de biomasa en los mares (en  $\text{km}^2$ ), es cerca de 2 veces más grande que la de la tierra.

El contenido energético de la materia producida anualmente por fotosíntesis es cerca de 10 veces mayor que el consumo mundial de energía.\*\* Además los residuos agrícolas (como las pajas de trigo y arroz) y los estiércoles animales se estiman en  $4.2 \times 10^9$  toneladas anuales, que si se aprovecharan con los procedimientos de conversión adecuados podrían representar unos 63 millones de TWh/año o sea cerca de la cuarta parte del consumo mundial total anual de energía.\*\*\*

Esta abundancia es relativa y aparente, ya que por una parte existen otros usos de la biomasa tanto más importantes que el de producción de energía, como la producción de alimentos, fertilizantes, materiales para la construcción y textiles, y por otra, no todos los recursos de biomasa podrían aprovecharse de manera económica y aún en el caso de que esto se pudiera realizar, no podría hacerse sin dañar seriamente a la ecología mundial.

\*\* ALONSO, Concheiro Antonio; RODRIGUEZ, Viqueira Luis. Diagnóstico y Pronóstico sobre Energía Solar, Biomasa y Energía Eólica. Proyecto 2106 CONACYT - Instituto de Ingeniería, Tomo II, UNAM.

\*\*\* Idem. al anterior

TABLA I.20) Producción mundial anual de biomasa

Biomasa	Superficie $10^6 \text{ Km}^2$	Producción anual de biomasa $10^9 \text{ Ton.}$	Equivalente energético $10^9 \text{ kWh}$
Bosques	57	68	345
Monte bajo	26	2.4	12
Pantanos	24	15	70
Regiones agrícolas	14	9	44
Desiertos	24	0	0
Ríos y lagos	4	5	25
Total de regiones continentales	149	100 (a)	496
Océanos	361	55	303
	510	155	799

Fuente: Apuntes de Energía y Desarrollo Económico, D.E.P.F.I., U.N.A.M. (1985).

(a) = Valor aproximado.

El aprovechamiento de la biomasa de ningún modo resolverá todos los problemas energéticos mundiales, pero sí podría llegar a ser una contribución importante.

Uno de los problemas principales en el aprovechamiento de la biomasa consiste en que esta no se encuentra distribuida de manera uniforme por toda la superficie de la tierra, además de que en algunas regiones su utilización excede a las existencias.

Dentro del grupo de biomasa no convencional se incluyen los siguientes recursos:

Residuos Agrícolas: Este es uno de los recursos más importantes de la biomasa, e incluye a productos como la paja de trigo y arroz, cañas, baqazos, ramas de la poda, etc. Actualmente se han desarrollado varios métodos para calcular las cantidades de residuos agrícolas producidos sobre la base de la parte comercializable de las cosechas, los cuales toman en cuenta ya los residuos que se deben dejar en el campo para contrarrestar la erosión y permitir el reciclado de nutrientes.

Residuos Forestales: Este es otro de los tres grandes recursos de la biomasa (junto con los residuos agrícolas y los cultivos energéticos), y está constituido por las cortezas de los árboles, la eliminación y caducidad natural de la capa inferior del follaje, y por todos los residuos de la actividad forestal y de la explotación de la madera (los cuales constituyen estos últimos, cerca de la mitad de la madera cortada. Se ha previsto que la utilización del papel y de productos de la pulpa de papel disminuirá a futuro, principalmente debido a los nuevos métodos electrónicos de transmisión de la información, por lo que los bosques podrían resultar aún más atractivos como fuentes de biomasa para la energía.

Abonos de Origen Animal: Estos constituyen una fuente primaria de biomasa, y en muchos lugares del mundo se les utiliza desde antiguo, cuando la madera y la leña escasean. No todos los abonos se encuentran disponibles para fines energéticos, ya que es muy frecuente que los animales pasten en extensas regiones muy distantes entre sí, por lo que no se puede reunir sus abonos con facilidad.

Cultivos Energéticos: Este es el tercer grupo de mayor importancia de los recursos de biomasa, y por su amplitud y variedad tal vez sea el más importante de ellos. Estos cultivos pueden realizarse en -- tierras no utilizadas o subcultivadas que casi todos los países del mundo tienen, y que serían susceptibles de utilizarse con fines ener-- géticos, como los desiertos, zonas muy áridas, masas de agua poten-- cialmente productivas (ver plantas acuáticas), etc. Entre los cul-- tivos más importantes propuestos como fuente de energía se encuen-- tran: Caña de azúcar, sorgo dulce, soya, girasol, yuca, euforbia, maníoca, etc. También resulta muy importante el concepto de sil-- vicultura como fuente de energía, que incluye a la madera (que se -- vió en el capítulo II.1.2) particularmente los cultivos de árboles -- de rotación breve.

Finalmente el otro grupo de gran importancia está consti-- tuído por la vegetación perenne que se define como el inventario ac-- tual de los árboles o partes de árboles no aptos en la actualidad pa-- ra usos industriales o estructurales, el cual a su vez se subdivide -- en vegetación herbácea y vegetación leñosa. El primero de ellos es-- tá constituido por hierbas y diversos tipos de pastos como el pasto -- napier, y se diferencia de la vegetación leñosa, por estar constituf-- do por tallos tiernos que no viven de un año a otro ni forman tejidos -- leñosos; la vegetación leñosa a su vez se constituye por arbustos, ár-- boles muertos, árboles de baja calidad o sin valor comercial, etc. Su disponibilidad varía ampliamente según las condiciones ecológicas -- locales. Uno de los problemas para su aprovechamiento consiste en -- que a menudo la vegetación perenne se encuentra dispersa, por lo que -- su tala y recolección requieren de un mayor tiempo y esfuerzo, de ahí -- que es probable que resulte más costosa que los otros cultivos energé-- ticos.

Cultivos Energéticos: Este es el tercer grupo de mayor importancia de los recursos de biomasa, y por su amplitud y variedad tal vez sea el más importante de ellos. Estos cultivos pueden realizarse en -- tierras no utilizadas o subcultivadas que casi todos los países del mundo tienen, y que serían susceptibles de utilizarse con fines ener-- géticos, como los desiertos, zonas muy áridas, masas de agua poten-- cialmente productivas (ver plantas acuáticas), etc. Entre los cul-- tivos más importantes propuestos como fuente de energía se encuen-- tran: Caña de azúcar, sorgo dulce, soya, girasol, yuca, euforbia, mandioca, etc. También resulta muy importante el concepto de sil-- vicultura como fuente de energía, que incluye a la madera (que se -- vió en el capítulo II.1.2) particularmente los cultivos de árboles - de rotación breve.

Finalmente el otro grupo de gran importancia está consti-- tuido por la vegetación perenne que se define como el inventario ac-- tual de los árboles o partes de árboles no aptos en la actualidad pa-- ra usos industriales o estructurales, el cual a su vez se subdivide - en vegetación herbácea y vegetación leñosa. El primero de ellos es-- tá constituido por hierbas y diversos tipos de pastos como el pasto - napier, y se diferencia de la vegetación leñosa, por estar constituf-- do por tallos tiernos que no viven de un año a otro ni forman tejidos leñosos; la vegetación leñosa a su vez se contituye por arbustos, ár-- boles muertos, árboles de baja calidad o sin valor comercial, etc. Su disponibilidad varía ampliamente según las condiciones ecológicas locales. Uno de los problemas para su aprovechamiento consiste en - que a menudo la vegetación perene se encuentra dispersa, por lo que - su tala y recolección requieren de un mayor tiempo y esfuerzo, de ahí que es probable que resulte más costosa que los otros cultivos energé-- ticos.

Aceites Vegetales: Estos aceites pueden obtenerse de una multitud de plantas que varían de las legumbres (soya, cacahuete, palmeras, haba--sú) a las semillas y pepitas (girasol, tabaco, colza, rapé, ricino, -lino, etc.), y se pueden emplear como combustibles, particularmente en los motores diesel.

Plantas Ricas en Hidrocarburos: Este tipo de plantas pueden crecer - en regiones semiáridas, por lo que se les ha dedicado bastante aten--ción a últimas fechas, entre las más importantes se tiene a la eutor--bia, ciertas variedades de la candelilla, el guayule, la joboba, el al--godoncillo, la asclepiadea, etc. Estos productos podrían substituir al petróleo, especialmente como fuentes de materia prima para la pro--ducción de productos químicos. Dado que pueden cultivarse en regio--nes semiáridas, no entrarían en competencia con los cultivos alimenti--cios. De estos productos pueden obtenerse productos tan complejos como latex, ceras, resinas, terpenos y otros hidrocarburos.

Plantas Acuáticas: Este recurso es también muy conocido con el nom--bre de biomasa acuática, y su importancia podría ser muy grande a futu--ro, ya que conforme vayan escaseando las tierras de cultivo, su utili--zación se irá haciendo cada vez más probable. Las más interesantes - hasta el momento parecen ser las micro y macro algas de aguas dulces, salobres y saladas, y algunas plantas acuáticas que además de poderse utilizar como alimento podrían constituir una importante fuente de --energía, como los jacintos de agua, la lenteja de agua, el lirio y la hidrila. Algunas especies son susceptibles también de aprovecharse para la fabricación de productos químicos. De algunas de estas plan--tas pueden obtenerse tanto hidrocarburos como uranio (ver uranio no -convencional).

\*\* Grupo de hidrocarburos, presentes en las esencias vegetales y ca--racterizados por la composición de su molécula, que tiene ocho á--tomos de hidrógeno por cada cinco de carbono.

Desperdicios sólidos y líquidos: En cualquier lugar donde existan asentamientos humanos; se generan desperdicios, cuyas cantidades y características varían según la época del año y el estado de desarrollo de la granja, pueblo, ciudad, etc. donde se generen. Los desperdicios sólidos (comunmente llamados basura), pueden ser serios contaminantes y deben utilizarse como fuente de energía, siempre que sea posible, a fin de reducir sus efectos nocivos. Comunmente se hace necesario reducir el tamaño de los desperdicios sólidos para poder utilizarlos con fines energéticos y en algunos procesos se tienen que separar las fracciones inorgánicas como vidrio, metal, cenizas, etc.

Por lo que toca a los desperdicios líquidos, estos consisten básicamente en aguas de desecho que incluyen: Las aguas industriales quienes en muchas ocasiones producen efluentes líquidos biodegradables en gran parte, entre los que se cuentan las de la industria alimenticia, como refinarias de azúcar, fábricas de alimentos enlatados, plantas de congelamiento de alimentos, mataderos, frigoríficos, cartidurías, fábricas de cerveza, destilerías, etc., y las de plantas de elaboración de ácido orgánico e instalaciones de carbonización.

Dentro de este grupo quedan incluidas también las aguas municipales, y las aguas cloacales y de desperdicios humanos, siendo estas últimas de gran importancia ya que generalmente si no se mezclan los desperdicios domésticos líquidos con algún otro afluente, son biodegradables.

Los excrementos humanos o el estiércol constituyen otra forma de residuos domésticos semisólidos, y cuando no existen sistemas de conducto de agua, se encuentran en cantidades casi constantes. Por otra parte su tratamiento resulta conveniente para disminuir los riesgos de enfermedades.

Todos los conceptos mencionados anteriormente pueden convertirse en energía.

Dos de las principales razones que han incrementado el interés por los usos energéticos de la biomasa son:

- a) Que existen ya tecnologías bien definidas y desarrolladas para generar a partir de la misma energía calorífica (quemándola en calderas) combustibles líquidos y gaseosos, como alcoholes etilícos y metílicos o metano, los cuales se pueden emplear en dispositivos que actualmente queman hidrocarburos, o en dispositivos estándar empleando una mezcla de biocombustibles de baja concentración a hidrocarburos, todo ello realizando únicamente pequeñas modificaciones. O sea que los combustibles obtenidos de la biomasa pueden ser complemento e incluso sustituto de los combustibles fósiles.

b) De la biomasa se pueden obtener también una gran cantidad de sustancias orgánicas empleadas en industrias como la de la petroquímica, y que actualmente se obtienen del petróleo, el gas natural o el carbón.

Además, la biomasa es quizá la única opción entre las fuentes de energía renovables que tiene el potencial para producir a futuro cantidades importantes de combustibles líquidos y gaseosos\*\*, e incluso se le puede utilizar como un combustible sólido (leña, carbón vegetal, basuras, etc.)

En lo que toca al tipo de tecnología a utilizar, para convertir la biomasa en energía, esto dependerá básicamente de la clase de biomasa, su contenido de humedad, las condiciones del proceso de conversión (como la tasa de alimentación de la materia, tamaño de las partículas, relación biomasa-aire, temperatura de conversión, etc), y el uso final del producto.

\*\* Excluyendo la producción de hidrógeno, ya que esta puede lograrse también por medio de otras fuentes de energía.

Actualmente existen 2 tipos de tecnologías básicas de conversión, que son las biológicas y las termoquímicas. En la figura I.19 - se muestran los diversos productos que se pueden obtener de la biomasa en base a estos procesos, y los sectores en que podrían utilizarse.

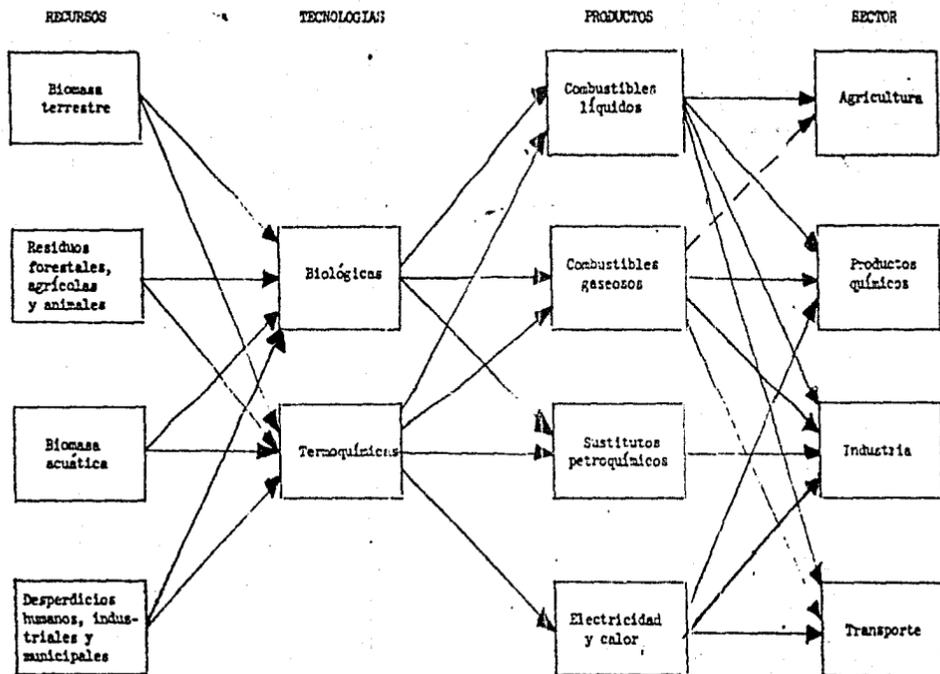
Por otra parte, en la figura I.20 se muestran los procesos de conversión de la biomasa y los productos que se pueden obtener.

La conversión biológica entraña la desintegración enzimática de la biomasa, con producción de energía.

El tratamiento de la materia orgánica mediante la digestión anaeróbica cumple con tres funciones básicas: La producción de un gas combustible; producción de mejoradores de suelos o fertilizantes o complementos de alimentos forrajeros; reducir la contaminación ambiental producida por la disposición de desechos no tratados. Quizá estas dos últimas funciones sean más importantes que la primera, y de hecho son las que hacen aún más atractivo el proceso.

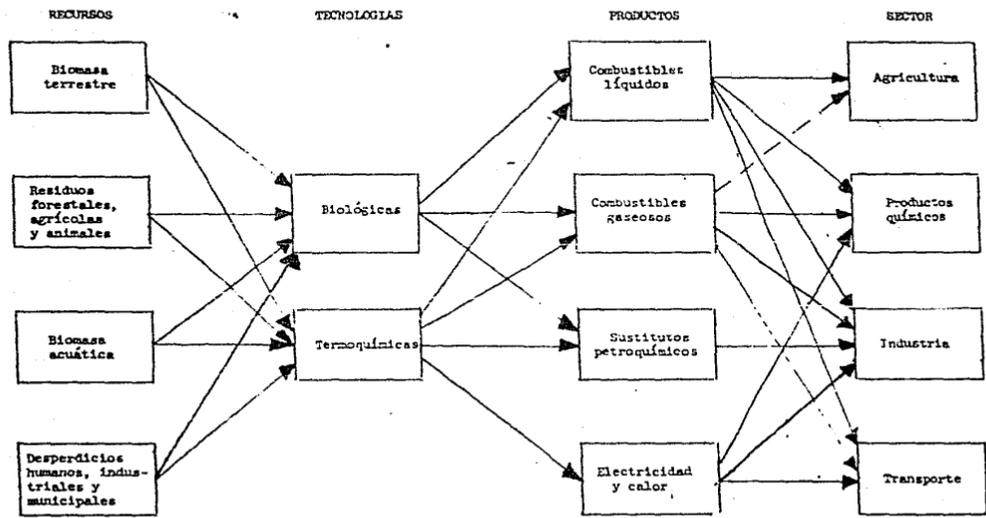
Los principales métodos de conversión biológica son la digestión anaeróbica (biometanización), y la fermentación alcohólica.

La digestión anaeróbica o biometanización es un proceso microbiológico que convierte la biomasa, en ausencia de oxígeno, en una mezcla de esencialmente dióxido de carbono y metano (biogás), que se puede utilizar como combustible, produciéndose además un residuo estabilizado (lodos residuales), que es particularmente adecuado como fertilizante orgánico o mejorador del suelo.

Figura I.19) Sistemas energéticos de biomasa

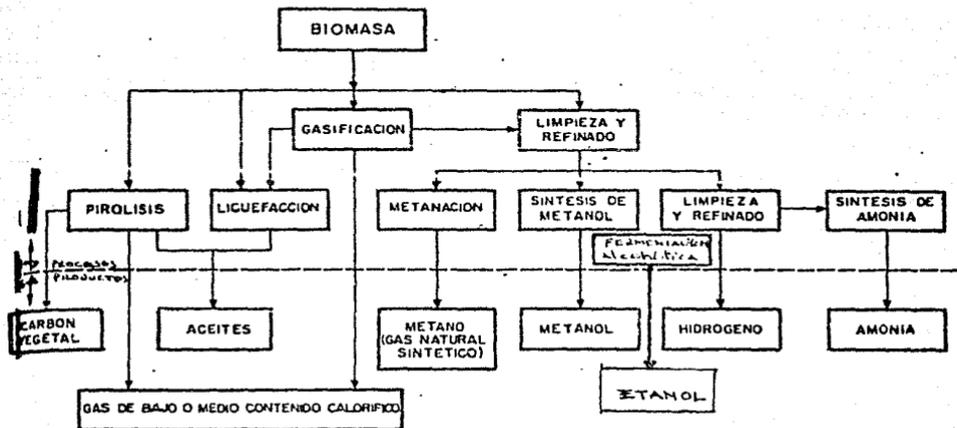
Fuente: Informe del Grupo Técnico sobre Energía de Biomasa. O.N.U. (1981).

Figura I.19) Sistemas energéticos de biomasa



Fuente: Informe del Grupo Técnico sobre Energía de Biomasa. O.N.U. (1981).

FIGURA I.20) PROCESOS DE CONVERSION DE LA BIOMASA Y PRODUCTOS QUE PUEDEN OBTENERSE.



Fuente: Braunstein HM, et al, Biomass Energy Systems and the Environment, Pergamon Press, New York, 1981.

La biometanización es un proceso común, que se utiliza desde hace más de un siglo en el tratamiento de aguas cloacales para estabilizar los sólidos sedimentables y reaprovechar los nutrientes, -- sin embargo es hasta hace apenas unos años que se ha empezado a entender su mecanismo. Este proceso funciona de una manera óptima en el caso de sustancias orgánicas con alto contenido de humedad, por este motivo son estas la preferidas para ello. Generalmente es mayor la cantidad producida de metano que la de dióxido de carbono. Por otra parte, el gas puede quemarse directamente o se puede mejorar hasta adquirir un alto valor energético o convertirse en gas natural sintético mediante la eliminación del dióxido de carbono. Actualmente se realizan investigaciones a fin de convertir diversas materias primas de la biomasa, como tallos de maíz, paja, hierbas, y plantas acuáticas, por separado o mezcladas, en gases de alto e intermedio valor energético. Se han obtenido también varios productos químicos por otros procesos anaeróbicos, entre estos productos se tienen: acetona-butanol, ácido acético, y otros ácidos grasos.

Por lo que respecta a la fermentación alcohólica, existen dos procesos básicos que consisten en la producción de etanol a partir de cultivos ricos en azúcares o almidones o, después de la despolimerización química o enzimática, de lignocelulosa en azúcares simples y lignina.

El etanol se produce por conversión biológica aeróbica de -- azúcares, mediante microorganismos como levaduras, bacterias y hongos. De hecho el etanol es un alcohol, que se puede emplear como combustible en sustitución de la gasolina, o bien mezclado con ella, además puede utilizarse también como insumo en la obtención de productos químicos como vitaminas, antibióticos, solventes y otros.

Esta tecnología se encuentra ya bien desarrollada, y existen varios países como Brasil, India, Zimbawe y Estados Unidos que tienen programas muy importantes para la fabricación de etanol combustible.

Los más importantes esfuerzos en materia de fermentación se han concentrado en el uso de cultivos azucareros como la caña de azúcar, el sorgo dulce, la remolacha azucarera y las frutas, todos ellos en lugar de los cereales. Siendo al parecer el más viable, el sorgo dulce, ya que se puede cultivar en muchas regiones del mundo, no es muy utilizado como alimento ni para los hombres ni para los animales, y permite obtener cerca del doble de azúcar y de alcohol en bruto por hectárea, que el maíz. Por lo que respecta a la despolimerización, esta se encuentra todavía a nivel de estudio, los cuales se han orientado hacia la hidrólisis de los residuos agrícolas y forestales, de nuevos cultivos.

La conversión termoquímica consiste en una serie de procesos utilizados para la conversión de la biomasa en productos energéticos, todo ello a través del uso de altas temperaturas. Los principales procesos termoquímicos son: Combustión directa; pirólisis, gasificación y licuefacción directa; licuefacción. Los productos que se pueden obtener con estos procesos incluyen combustibles sólidos, aceites, y gases de bajo y mediano poder calorífico, estos gases pueden convertirse posteriormente en metano, metanol (alcohol metílico), hidrógeno y amoníaco. Solo en el caso del metano no se dispone todavía de la tecnología adecuada.

La principal utilización de la combustión directa es para la producción de calor, (consultar el tema de biomasa convencional).

La biomasa suministra calor, vapor y electricidad en pequeña escala en las industrias de productos forestales, papel y pulpa de madera, utilizando como combustibles la corteza de la madera, el

aserrín y otros residuos de los aserraderos y fábricas de pulpa de madera. En las zonas rurales se pueden utilizar como combustibles para la combustión directa, los residuos de las cosechas, hierbas, estiércol, etc. (sin contar desde luego la leña).

La eficiencia en estos procesos varía desde un 3 a un 10% en los procesos tradicionales y rústicos de quemado; hasta un 60 a 80% en los sistemas modernos de hornos y unidades de quemado. Aunque se pueden emplear materiales con un contenido de humedad de hasta un 65%, entre menor sea esta, la eficiencia de conversión será mayor.

Sin embargo la combustión directa presenta problemas de contaminación, debido a las grandes cantidades de cenizas producidas y contenidas en los gases que resultan de la combustión, por lo que se hace necesario la utilización de dispositivos anticontaminantes que -- que aumentan el costo de las instalaciones.

Existen dos tipos de instalaciones para el aprovechamiento energético de los desperdicios urbanos sólidos, y son: los de masa o incineración tradicional en que se colocan y queman dichos desperdicios en una parrilla inclinada; y la combustión de desperdicios preparados, en los que se separa el material alimentador por medio de diversos elementos como separadores magnéticos, clasificadores de aire, etc. a fin de hacer más homogéneo el combustible.

La pirólisis es la descomposición térmica de materiales carbónicos en ausencia de oxígeno, aunque algunas tecnologías emplean pequeñas cantidades de aire en el reactor pirólítico. Por medio de la pirólisis se producen cantidades aproximadamente iguales de gas, aceite y carbón vegetal, pero uno o más de los tres, deben de utilizarse para proporcionar la energía para el proceso.

Los reactores pirólíticos operan a presiones cercanas a la atmosférica y a temperaturas adecuadas para volatizar la biomasa en líquidos y gases, quedando como residuo carbón vegetal. Cuando se utilizan temperaturas por los 205° C se obtienen líquidos principalmente, y cuando las temperaturas son del orden de los 650° C, se obtienen gases principalmente. Los gases obtenidos son de bajo poder calorífico y casi siempre se quema una parte importante de ellos para proporcionar el calor de proceso requerido, aunque puede depurarse para ser utilizado en motores; los aceites obtenidos tienen bajo contenido de azufre, cenizas y nitrógeno, por lo que no presentan casi problemas de tipo ecológico en su combustión, sin embargo son ácidos y termosensibles, por lo que requieren de ciertas precauciones en su manejo; el carbón vegetal es más fácil de manejar, almacenar, transportar y distribuir, además de que contiene también poco azufre y nitrógeno, y su contenido calorífico es mayor que el de la biomasa. Un ejemplo actual de la utilización de la pirólisis consiste en la destilación seca de la madera, para producir metanol, carbón vegetal y gas de bajo poder energético.

La gasificación se define como la descomposición térmica de material orgánico con ayuda de un gas auxiliar, como aire u oxígeno, a fin de obtener únicamente productos finales gaseosos, que consisten generalmente en una mezcla de gases que contienen monóxido de carbono e hidrógeno como principales combustibles. La gasificación se basa en la oxidación incompleta de la biomasa empleada como materia prima, produciendo gases de bajo a alto contenido energético, según se emplee aire u oxígeno puro y según las presiones y temperaturas de la reacción. Generalmente el gas producido se tiene que purificar antes de almacenarse, transportarse o usarse. Las principales metas que se tienen en materia de gasificación y licuefacción indirecta consisten en la producción de gas de mediano valor energé-

tico; gas de alto valor energético o gas natural sintético; y la conversión del gas en combustible líquido por licuefacción indirecta para producir metanol o combustible sintético (gasolina). Los gasificadores actualmente en estudio son de lecho fijo, lecho fluidizado, de arrastre y de baño fundido.

La licuefacción es un proceso en que los materiales con alto contenido de carbón pierden oxígeno a través de una reacción con monóxido de carbono. Al perder oxígeno y ganar hidrógeno, ya sea por o a partir de agua, el material se convierte en un aceite (líquido).

La licuefacción puede darse procesando directamente la biomasa o a través de de un paso preliminar de gasificación.

En la tabla I.21 se muestra el estado actual de desarrollo de diversas tecnologías para el aprovechamiento energético de la biomasa según su origen.

Respecto al consumo de biomasa en México, los datos de que se disponen además de considerarse insuficientes, son poco precisos, los más recientes de que dispuso el autor son los que se presentaron en el capítulo 1.4, obtenidos del Balance Nacional de Energía 1982-1984, que, repitiendo, señalan un 1% y un 3.4% de la producción de energía primaria, para el bagazo de caña y la leña respectivamente., (recordar que en este trabajo la leña se incluyó dentro de lo que se denominó biomasa convencional).

TABLA I.21) Estado actual de desarrollo de las diferentes tecnologías para aprovechar la biomasa energéticamente, según el origen de la misma.

	PRODUCCION		CONVERSION BIOQUIMICA				CONVERSION DIRECTA				CONVERSION TERMOQUIMICA			
	CULTIVO	RECOLECCION Y BENEFICIO	DIGESTION ANEROBIA	FERMENTACION			RESIDENCIAL	COMERCIAL	INDUSTRIAL	GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA	GASIFICACION			
				DESIFICACION	ALICAROS Y ALMIDONES	CONVERSION DE CELULOSA					OBTENCION DE PROD. QUIMICOS	LIQUEFACCION	BAJO CALOR	MEDIO CALOR
RESIDUOS URBANOS (basura)	X	3a5	X	3a5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
RESIDUOS SOLIDOS (basura)	X	1a5 2a5	2y3	X	1a3 1		Y	2a3 2a5 2a5	2a5	2y3	1	4y3	4y3	
RESIDUOS ANIMALES	X	3a5	X	1a5	X	1	0	5	X	X	X	1y2	1	0 1y2
RESIDUOS AGRICOLAS	X	2a4 2	1a3	X	1a2 1y2			1a2 1y2 4y5	4	3y4	2y3	2y3	1y2	
RESIDUOS FORESTALES	X	2a3 3y5	1a3	X	1a2 1y2			4y5 4 4y5	4	3y4	2y3	2y3	1y2	
RESIDUOS DE PROCESOS	X	3a5 3y4	1a2	4	1a3 1			5 5 5 4y5	4y5	3y4	2y3	2a4	1y2	
PRODUCTOS AGRICOLAS	5	4y5	X	0	4y5	X	2a5	X	X	X	X	X	X	X
ARBOLES	4	4y5	X	X	X	1y2 1y2		5	4	5	4	2a4	2a4	2a4 2
GRANJAS ENERGETICAS														
Agrícolas	1a3	2a5	X	1y2	2a4	1	1	4	4	4	2a4	0	2y3	0 0
Silvícolas	1a3	2a3	X	1y2	X	1y2	1	4	4	4	2a4	2a4	2	2a4 2y3
Acuáticas	1y2	1a5	X	1y4	X	1y2	1	X	X	X	X	X	X	X
PLANTAS PRODUCTORAS DE HIDROCARBUROS	1	1	X	X	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X

## NOTACION:

X.	No se aplica
0.	Sin explorar
1.	Investigación
2.	Desarrollo
3.	Demostración
4.	Comercialmente Disponible
5.	Aplicación Generalizada

Fuente: Hall CW, Biomass and an Alternative Fuel, Government Institute Inc, Rochervills, Maryland, USA, August 1981.

I) Recursos Solares.

La energía solar que llega a la superficie terrestre, se puede convertir en energía útil (calorífica, eléctrica, mecánica), a través de diversas tecnologías.

La radiación solar total que alcanza la atmósfera terrestre corresponde a una cantidad de  $5.4 \times 10^{24}$  joules/año, equivalentes a  $1.73 \times 10^{14}$  kw, o a  $1.51 \times 10^{14}$  kWh/año.\*\* Sin embargo la recibida por la superficie de la tierra varía de manera muy considerable, ello debido principalmente al proceso de reflexión y absorción que se realiza en la atmósfera.

Se define como constante solar a la cantidad de energía recibida del sol en un área expuesta perpendicularmente a sus rayos, a una distancia promedio del sol a la tierra y en ausencia de la atmósfera terrestre, y tiene un valor aceptado de  $1.353 \text{ kW/m}^2$ , que equivale a  $11.85 \times 10^3 \text{ kWh/m}^2$  por año, ó a  $42.668 \text{ MJ/m}^2$  por año.\*\*\* En realidad en la superficie terrestre, este valor rara vez sobrepasa el valor de  $1 \text{ kW/m}^2$ .

\*\* ALONSO, Concheiro Antonio; RODRIGUEZ, Viqueira Luis.  
Diagnóstico y Pronóstico sobre la Energía Solar, Biomasa y Energía Eólica.  
Tomo II, Proyecto 2106 CONACYT-Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.  
noviembre de 1982

\*\*\* Idem. al anterior.

No toda la radiación recibida del sol tiene la misma longitud de onda. El espectro solar está compuesto por la región ultravioleta con el 9.293% de la energía, la región visible con el 41,476% de la energía y la región infrarroja con el 49.231% de la energía, --- pero la máxima intensidad de la energía solar ocurre en la región --- visible del espectro.

La radiación solar se descompone en directa y difusa, la directa se refiere al flujo de rayos solares recibidos desde la dirección del disco solar; y la difusa es la que llega a la superficie de la tierra desde el resto del cielo y es producto de la dispersión que sufre la luz solar a través de la atmósfera terrestre. La proporción de cada una en la radiación total, depende de diversos factores como la nubosidad, humedad, presencia de partículas en la atmósfera - (smog), etc. Pudiendo corresponder la radiación difusa desde un 10 a un 85% de la radiación total.

El vapor energético medio por año del flujo solar al nivel de la superficie de la tierra varía de  $7.2 \text{ MJ/m}^2$  ( $2,000 \text{ kWh/m}^2$ ), por día en latitudes como la del norte de Europa, a  $21.6 \text{ MJ/m}^2$  ( $6,000 \text{ kWh/m}^2$ ) por día en zonas muy soleadas\*\*.

La energía solar que llega a la superficie de la tierra --- equivale a 13,000 veces la producción mundial actual de energía a partir de combustibles fósiles y de uranio\*\*\*.

\*\* VIQUEIRA, Landa Jacinto.  
Apuntes de la Materia de Energía y Desarrollo Económico, Maestría en Ingeniería Energética, D.E.P.F.I., U.N.A.M., 1985.

\*\*\* Idem. al anterior

La energía solar tiene tres características que son la -- fuente de la mayor parte de las actuales dificultades tecnológicas:

Su distribución geográfica; su baja densidad energética -- por unidad de área, que hace que se requieran dispositivos de gran -- extensión para poder captar cantidades importantes de energía; y su -- intermitencia que implica que para muchas de sus aplicaciones potenciales se requieran dispositivos de almacenamiento energético que -- las encarecen.

Todo ello conlleva a bajas eficiencias en la mayoría de -- los sistemas de conversión de la energía solar, y por consecuencia a -- costos elevados para su aprovechamiento.

Por el contrario, la energía solar tiene también muchas -- ventajas muy importantes. La primera y tal vez la más importante -- consiste en que es una fuente infinita de energía, si se toma como -- base las actuales necesidades mundiales de energía, de ahí que se le -- considere como una fuente renovable; además de que el recurso en sí -- no resulta contaminante; y dada su distribución, si se desarrollara -- la tecnología adecuada, se podrían instalar pequeñas minicentrales -- (que podrían satisfacer las necesidades tanto de energía térmica como -- eléctrica) en una gran parte de los hogares de todo el mundo, -- que satisfarían sus necesidades energéticas en casi un 100%, lo que -- las haría autosuficientes y permitiría eliminar muchos de los proble -- mas que presentan las grandes centrales eléctricas, como son el de -- la distribución y el de los grandes costos en técnicos, instalacio -- nes, mantenimiento, etc.

\*\* Existen excepciones en algunos sistemas de baja temperatura, que -- presentan altas eficiencias, como los de calefacción ambiental y -- de albercas, el secado industrial y agrícola, etc.

\*\*\* Sin embargo los dispositivos necesarios para su aprovechamiento -- si pueden serlo. (consultar la tabla II.9 donde se muestra esto -- más a detalle).

La utilización de la energía solar se remonta a tiempos muy antiguos. Se dice que los egipcios la utilizaban ya en sus construcciones, y a ellos se les atribuye el conocimiento del efecto invernadero, que les permitía alcanzar temperaturas de hasta 130 °C.\*\*

Cuenta la leyenda que Arquímedes detuvo una flota romana que asediaba Siracusa por medio de la concentración de la radiación solar de miles de pulidos escudos del ejército griego sobre las velas de la nave insignia, en el episodio que ha pasado a la historia como el de "los espejos ardientes": En 1747 el francés Buffon repitió parte del experimento incendiando una pila de leña que se encontraba a 60 m de distancia de 140 espejos planos, tratando con ello de validar la leyenda de Arquímedes.

Para el siglo XVII, la mayoría de las utilizaciones de la energía solar estaban relacionadas con la arquitectura. En 1615 - Salomón de Caus construyó una bomba de agua que funcionaba con energía solar.

En 1774 Lavoisier construyó el primer horno con 2 lentes, el cual era capaz de producir temperaturas de hasta 1500 °C, notando se ya que el fuego que se producía en este tipo de horno era más puro (menos contaminante) que el obtenido de los hornos convencionales de la época.

\*\* FERNANDEZ, Zayas José Luis.  
Introducción al Estudio de los Sistemas Solares Activos.  
Proyecto 2139, Instituto de Ingeniería, UNAM, noviembre de 1982.

A finales del siglo XVIII el suizo H.B. Saussure construyó varias máquinas solares basadas en el efecto invernadero.

Aunque no fue sino hasta un siglo después cuando se empezaron a difundir dispositivos sencillos para calentar el agua con fines domésticos, basados en este efecto.

Para poder transformar la energía solar en energía mecánica, el hombre tuvo que esperar hasta fines del siglo XIX y principios del siglo XX, en que sus conocimientos sobre termodinámica se lo pudieron permitir.

En la exposición universal de París en 1875, Mouchot mostró una imprenta que operaba por un gran espejo cóncavo, que concentraba la radiación solar y permitía a la misma trabajar con el vapor que se generaba a una presión de 3.5 atmósferas.\*\*

En 1878 se operó el primer refrigerador con energía solar como fuente calorífica, mientras que en los albores del siglo XX — Schumann operó durante buen tiempo una bomba en El Cairo, que bombeaba agua del Río Nilo. En esa época, un sacerdote portugués que vivía en los E.U.A., de apellido Himalaya, operaba ya un espejo parabólico de  $80 \text{ m}^2$ , formado por 6000 elementos, alcanzando temperaturas cercanas a los  $4000 \text{ }^\circ\text{C}$ .\*\*\*

\*\* FERNANDEZ, Zayas José Luis.  
Introducción al Estudio de los Sistemas Solares Activos.  
Proyecto 2139, Instituto de Ingeniería, UNAM, noviembre de 1982.

\*\*\* Iden al anterior.

Posteriormente a estos acontecimientos, vendría una disminución mundial en el interés por la energía solar, debido más que nada al advenimiento de los combustibles fósiles de fácil industrialización y comercialización. Lo que se ha reflejado en los pocos usos actuales, desde el punto de vista comercial, de la energía solar (calentadores solares, calculadoras, etc.). En áreas sumamente especializadas, como la de la industria espacial, su utilización sí juega un papel bastante importante, aunque a costos sumamente elevados.

Sin embargo, después de las crisis energéticas de 1973 y 1979, el interés por los sistemas solares ha renacido, de una manera inimaginable, siendo en la actualidad una de las fuentes a la que más recursos se dedican para su investigación y desarrollo, lo cual es sumamente importante, ya que constituye un recurso universal que es a la vez el más desaprovechado en el mundo.

La energía solar se puede aprovechar de manera directa, a través de procesos termodinámicos o fototérmicos; fotovoltaicos; fotoquímicos; y termiónicos. O indirectamente a través del aprovechamiento de la energía hidráulica, de la biomasa, de la energía eólica, de la energía de las olas, de los gradientes térmicos de los mares, etc.

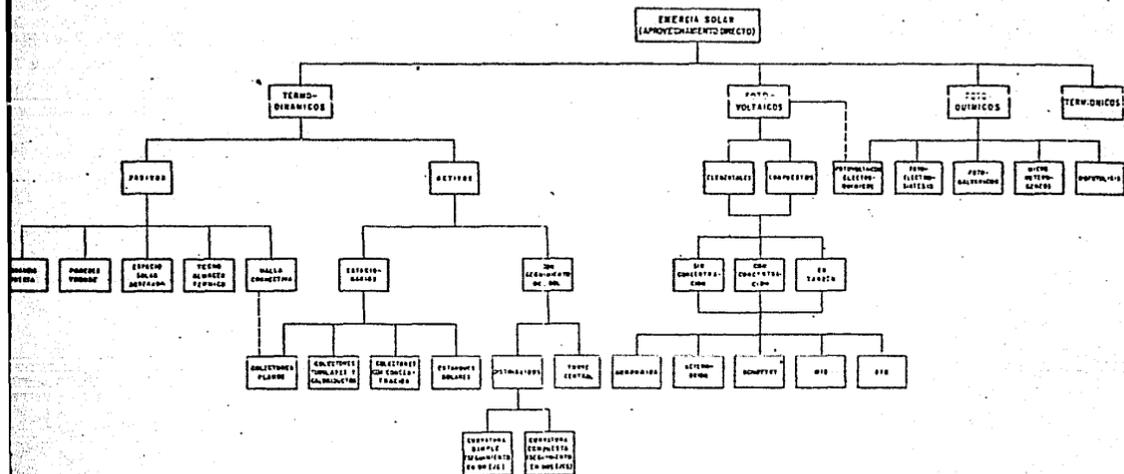
A continuación se presentan las principales tecnologías - para el aprovechamiento directo de la energía solar. (consultar la figura I.21).

Sistemas Termodinámicos: Los sistemas termodinámicos o fototérmicos son sin duda alguna los más estudiados y explotados desde la antigüedad. En esencia se trata de captar y aprovechar la radiación solar (directa o reflejada) a través de una superficie (colector-absorbedor) que por efecto de la radiación que recibe, aumenta su temperatura. Así, el calor ganado se transfiere a algún fluido - que puede ser aire, agua, aceite, fluidos de alto peso molecular, - etc., que a su vez se utiliza para proporcionar energía útil (calorífica, mecánica, eléctrica o producción de combustibles).

Según la temperatura a la que se aprovecha la energía calorífica, las tecnologías de conversión presentan grandes diferencias y niveles de complejidad. Los sistemas más económicos y simples son los que operan a temperaturas menores de 100° C, y mientras que aquellos que operan a temperaturas mayores de 200-250° C, son más caros y complejos y por lo general están asociados con la producción de electricidad.

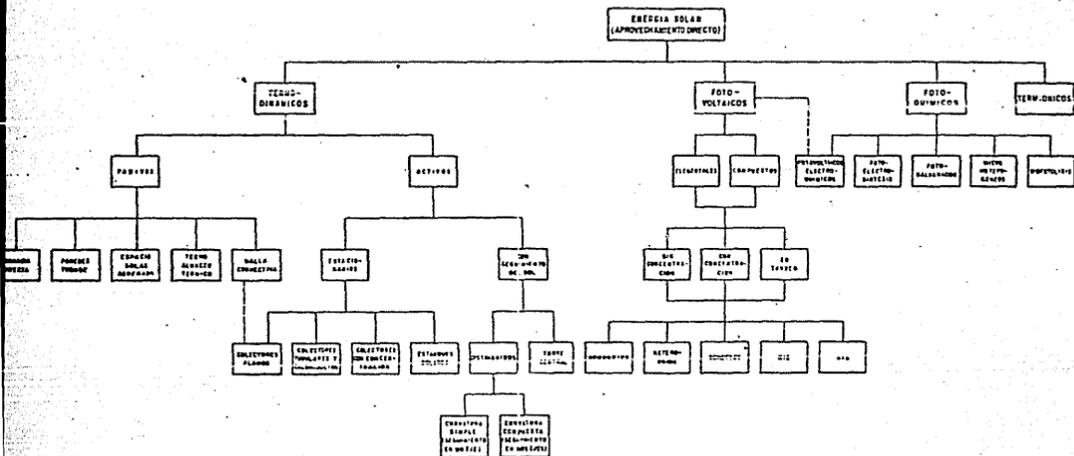
\*\* En algunos casos un solo material capta y absorbe la energía solar (colectores planos), y en otros, un espejo capta la radiación solar y la refleja hacia otra superficie donde es absorbida.

FIGURA I.21) TECNOLOGIAS PARA EL APROVECHAMIENTO DIRECTO DE LA ENERGIA SOLAR.



Fuente: Diagnóstico y Pronóstico sobre Energía Solar, Biomasa y Energía Eólica (1982).

FIGURA I. 21) TECNOLOGÍAS PARA EL APROVECHAMIENTO DIRECTO DE LA ENERGÍA SOLAR.



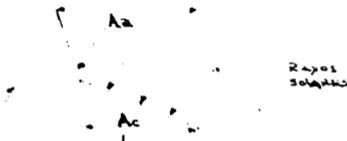
Fuente: Diagnóstico y Pronóstico sobre Energía Solar, Biomasa y Energía Eólica (1982).

Los sistemas termodinámicos pueden clasificarse en base a su temperatura en: Sistemas de baja temperatura, que van de la temperatura ambiente a aproximadamente la temperatura ambiente más 60 °C, y entre los que se cuentan los colectores planos y los colectores planos con espejo, y con relaciones de concentración de 1 a 2 aproximadamente; \*\* sistemas de temperatura intermedia con temperaturas de 120- a 250 °C aproximadamente y relaciones de concentración de 20 a 50, - entre ellos se tienen los colectores parabólicos con un movimiento; - y los sistemas de alta temperatura, con temperaturas de 250 a 3,400- o más °C, y relaciones de concentración de 50 a 10,000 entre los que se cuentan los platos parabólicos con dos movimientos y sus sistemas equivalentes. \*\*\*

En base a esta clasificación puede decirse que en la actualidad entre mayor sea la temperatura de operación, menor será el desarrollo tecnológico y la viabilidad económica del sistema de conversión.

En el presente trabajo, por convenir así al desarrollo -- del mismo, se utilizará la clasificación que divide a los sistemas-- termodinámicos en: Sistemas térmicos pasivos, sistemas térmicos es-- tacionarios, y sistemas térmicos con seguimiento.

\*\* La relación de concentración se define como el cociente  $\frac{A_a}{A_c}$ , - donde  $A_a$  es el área de apertura y  $A_c$  el área de captación.



\*\*\* FERNANDEZ, Zayas Jose Luis.  
Apuntes de la Materia Conversión Termodinámica de la Energía Solar.  
Maestría en Ingeniería Energética, DEFFI, UNAM. México, 1985.

Los sistemas térmicos pasivos son aquellos en que la energía solar captada se convierte en calor sin emplear para ello equipos auxiliares electromecánicos (activos), como ventiladores o bombas. La transferencia de calor, y en su caso la circulación del fluido caliente, se realizan de manera natural. Sus principales usos consisten en el acondicionamiento del ambiente, tanto en hogares y edificios, como en invernaderos; y en el calentamiento de agua a baja temperatura. Entre sus ventajas están que por operar de manera natural no requieren de elementos activos que se desgasten o decompongan y - por lo tanto están casi exentos de mantenimiento, además sus principios de operación son fáciles y sencillos, su costo es menor que el de los sistemas solares activos, los diseños son por lo general más estéticos que los que requieren captadores solares, y no dependen de la existencia o alimentación de energía eléctrica. Estos sistemas se subdividen su vez en:

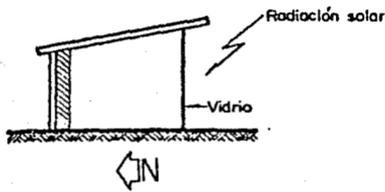
- i) Sistemas de ganancia directa, en los cuales la energía captada - en exceso con respecto a la requerida durante el día, se almacena en los elementos constructivos de la edificación, como paredes de concreto, ladrillos, adobe, etc.
- ii) Sistemas con paredes de almacenamiento térmico o muros de Trombe, que presentan la ventaja sobre el sistema anterior de no presentar en el interior, variaciones tan grandes de temperatura entre el día y la noche, además de aislar dicho ambiente en condiciones extremas.
- iii) Sistemas con espacio solar agregado, los cuales son una combinación de los dos sistemas anteriores, presentando ventajas más parecidas a las de los sistemas con paredes de aislamiento térmico.
- iv) Sistemas con techos de almacenamiento térmico, en los cuales la captación de la energía solar y el almacenamiento del calor, se hacen en el techo de la construcción, siendo muy apropiados para sistemas combinados de calentamiento solar pasivo y de enfriamiento natural en climas relativamente secos.

V) Sistemas de malla convectiva, en los que la circulación del fluido se logra por un efecto termosifónico, siendo poco usuales. En la figura I.22 se muestran de manera esquemática estos sistemas.

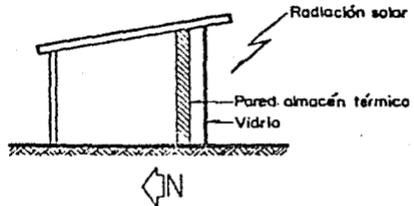
Los sistemas térmicos estacionarios capturan la energía solar incidente sobre la superficie terrestre mediante dispositivos colectores fijos, o sea, que no modifican su posición para intentar seguir el movimiento aparente del sol. Estos colectores convierten la energía solar en energía calorífica y la transfieren a un fluido de trabajo.

De este modo, los colectores son adicionalmente intercambiadores de calor. Los sistemas térmicos pasivos que se trataron anteriormente, son también estacionarios, pero se distinguen de estos en el hecho de no emplear para su operación elementos activos como bombas o ventiladores. Por otro lado, los sistemas térmicos estacionarios se dividen a su vez en base al tipo de colector empleado en:

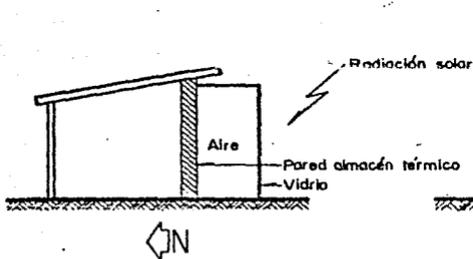
i) Colectores planos: Que son los más antiguos y más ampliamente utilizados, además de ser los más desarrollados en su tecnología, su caso es muy curioso, ya que en los primeros 20 años del presente siglo, fueron muy utilizados ya que resultaban económicamente competitivos con otros sistemas, sin embargo a partir de esa fecha con la baja en los precios del petróleo y sobre todo del gas natural, su utilización dejó de ser atractiva, para volver a serlo a partir de los años 70. Estos dispositivos suelen ser bastante robustos, tienen eficiencias de captación de la energía solar del orden de un 30%, y permiten alcanzar temperaturas no muy altas (menores a 100° C) en los fluidos.



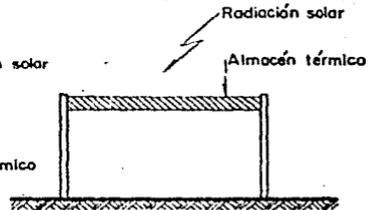
a) De ganancia directa



b) Con pared de almacenamiento térmico



c) Con espacio agregado



d) Con techos de almacenamiento térmico

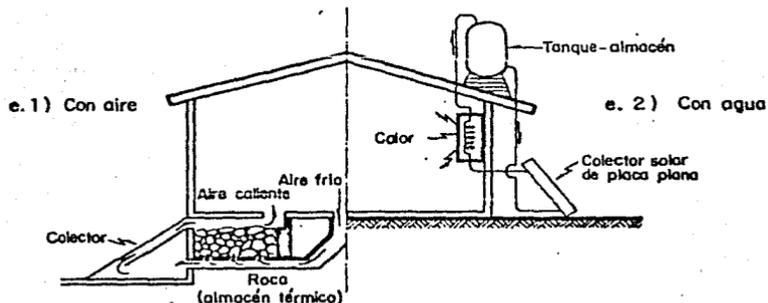


FIGURA I.22) Sistemas solares térmicos pasivos

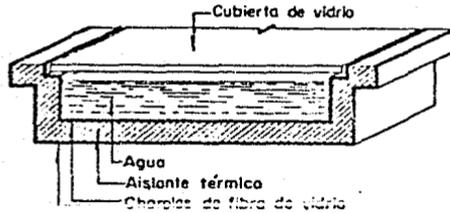
Básicamente un colector plano consta de una superficie -- plana o absorbedor hecha de metal, usualmente cobre, cuya superficie expuesta al Sol es oscurecida para aumentar su absorción de calor, y de una red de tubos soldados al absorbedor. Este conjunto se coloca en una caja aislante por detrás del absorbedor y una o varias -- capas de vidrio (u otra película semitransparente) generalmente plana sobre el mismo. Su utilización actual consiste básicamente en el calentamiento de agua y el acondicionamiento ambiental.

En países como Japón e Israel su uso está plenamente generalizado. En la figura 1.23 se muestran algunos tipos de colectores planos.

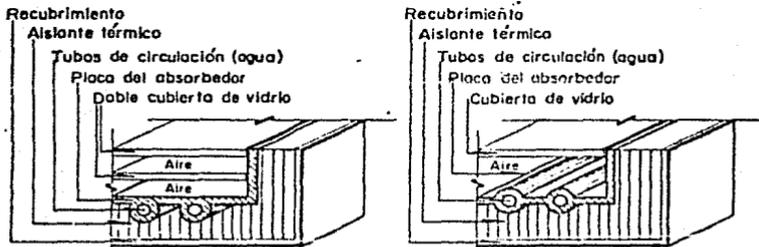
ii) Collectores tubulares: Su invención data de principios de siglo. A algunos de estos colectores se les conoce también con el -- nombre de caloriductos, y aunque su precio es mayor que el de los colectores planos, su eficiencia es mayor a temperaturas superiores a los 60 °C y permiten mayores temperaturas de operación (hasta 165 °C), además de ser más ligeros. Su utilización se ha vuelto a examinar -- a partir de la década de los 70 a la luz de los avances en la tecnología de vacío.

iii) Collectores solares con concentración: Su aparición es muy reciente y su principio de operación es el mismo que el de los colectores planos o tubulares, solo que para aumentar la cantidad de energía recibida sin aumentar proporcionalmente el área de absorbedor expuesta al Sol y por tanto las pérdidas, se emplean espejos que reflejan la radiación que incide sobre ellos en un área de absorbedor más pequeña. Se cree que este tipo de colector tiene muy poco potencial de aplicación.

iv) Estanques solares: Este tipo de tecnología data como idea -- desde principios de siglo y ya ha demostrado su viabilidad, al menos en zonas específicas como el Mar Muerto. De hecho, una masa estática de agua (estanque, lago, mar) es un colector solar en potencia que dispone además de una gran área de captación. En estos, el colector y el



a) Colector de bajo costo



b) Colectores planos comerciales comunes

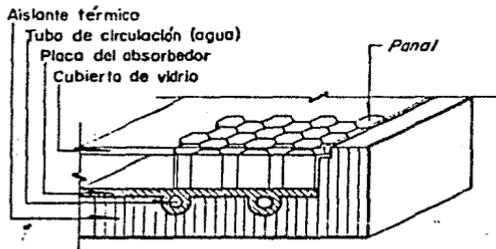
c) Colector plano tipo *Panal*

FIGURA I.23) Algunos diseños de colectores planos

almacén térmico son uno mismo, ya que el mismo cuerpo de agua efectúa ambas funciones. El interés por este tipo de tecnología ha vuelto a aparecer a partir de las crisis de hidrocarburos, en la década de los 70. Algunos países como los Estados Unidos han dirigido la investigación hacia la producción de calor, mientras que otros como Israel, lo han hecho hacia la producción de electricidad (contando desde diciembre de 1979 con un estanque solar que produce a través de una planta termoeléctrica 150 KW).

Los sistemas térmicos con seguimiento se utilizan cuando se desean alcanzar temperaturas mayores a 250° C. Estos sistemas utilizan colectores con altas relaciones de concentración que reflejan los rayos solares en áreas muy pequeñas comparadas con la de captación (estas áreas deben ser tan pequeñas como se pueda, con el fin de reducir las pérdidas de calor), y para ello deberán seguir el movimiento aparente del sol. El conocimiento básico de este tipo de colectores se conocía por los griegos desde el siglo IV antes de Cristo. Y desde fines del siglo pasado numerosos investigadores en todo el mundo se ha dedicado a desarrollarlos, habiendo resurgido a partir de los 70. Estos sistemas se subdividen a su vez en: 1) Sistemas distribuidos que consisten en un conjunto de espejos o lentes que reciben la radiación solar y la reflejan o la refractan hacia un absorbedor con una superficie muy pequeña en comparación con el área de captación, este absorbedor eleva su temperatura y cede calor al ponerse en contacto con el fluido de contacto que circula por su interior. Con estos colectores pueden obtenerse temperaturas de entre 150 y 600° C. Se ha propuesto este tipo de aparatos para aplicaciones en sistemas de bombeo e irrigación, generación de calor para usos industriales y acondicionamiento ambiental, y para generar energía eléctrica.

ii) Sistemas con torre central o centralizados, cuya concepción es prácticamente la misma que la de los sistemas distribuidos, con la diferencia de que todos los colectores reflejan la radiación del sol - hacia un absorbedor común, que se encuentra en la parte superior de -- una estructura o torre. Estos sistemas utilizan para reflejar los - rayos del sol, espejos planos, llamados heliostatos. Su principal - utilización está propuesta para la generación de energía eléctrica en plantas de varios MW<sub>e</sub>, aunque se les puede utilizar también en la producción de vapor para las industrias.

Sistemas Fotovoltaicos: La energía de la luz del sol se puede utilizar para producir electricidad, por medio de las celdas solares o fotovoltaicas. Estas absorben la energía de los fotones presentes en la luz que incide sobre ellas y la convierten en electricidad.

Dichas celdas están constituidas por materiales semiconductores, principalmente de silicio monocristalino, policristalino o amorfo (cabe mencionar que el silicio es el segundo elemento más abundante en la tierra), aunque existen de otros muchos materiales más, en la mayoría de los casos todavía a nivel de experimentación.

Si bien el efecto fotovoltaico se conoce desde 1839, gracias a su descubrimiento por el físico francés Becquerel, el primer -- dispositivo fotovoltaico práctico no apareció hasta 1954.

Los equipos fotovoltaicos suelen requerir de sistemas de almacenamiento de la energía eléctrica, lo cual aumenta de manera importante

los costos, además dado que las celdas solares son unidades pequeñas y que generan potencias bajas, resulta conveniente conectar eléctricamente varias de ellas y protegerlas en algún dispositivo que las de soporte y protección, que se conoce como módulo fotovoltaico.

Las ventajas potenciales de la conversión fotovoltaica son muy grandes, siendo entre otras las siguientes: No tienen partes móviles; su mantenimiento es muy simple y su vida muy larga; exceptuando los casos de concentración de la energía solar, operan a temperatura ambiente; aprovechan tanto la radiación directa como la difusa; presentan una característica modular que le da una capacidad para adaptarse a diferentes necesidades; es muy adecuada para la realización de instalaciones descentralizadas.

Las eficiencias máximas teóricas alcanzables con los dispositivos fotovoltaicos simples, varían entre un 10 y un 26% dependiendo del material que se utilice, aunque utilizando concentración de los rayos solares sobre las mismas, y utilizando celdas en tándem, se ha calculado que podrían obtenerse eficiencias teóricas máximas de entre 60 y 65% \*\*.

Actualmente, según el material que se utilice en las capas que forman las celdas solares, existen los siguientes tipos: Homounión, que son con las que se han logrado las mayores eficiencias de conversión, variando de 6 a 22% (eficiencia esta última máxima lograda hasta el momento); Heterounión, con eficiencias entre el 5 y el 14%; Scottky, con eficiencias del 5 al 13%; MIS, con eficiencias del 12 al 15%, SIS, con una eficiencia del 12%; y electroquímicas (ver sistemas fotoquímicos).

\*\* ALONSO, Concheiro Antonio; RODRIGUEZ, Viqueira Luis. Diagnóstico y Pronóstico sobre Energía Solar, Biomasa y Energía Eólica. Tomo I, Proyecto 2106 CONACYT - Instituto de Ingeniería, ----- U.N.A.M. Noviembre de 1982

Actualmente los países más desarrollados en los sistemas fotovoltaicos son los E.U.A., Japón, y Alemania, siendo México junto con Brasil y la India, de los más adelantados entre los países en desarrollo.

Sistemas Fotocquímicos: En estos sistemas la energía solar se convierte directamente en un potencial químico, que es por lo general susceptible de almacenarse en forma de un combustible, capaz de liberar posteriormente esta energía. (La fotosíntesis natural se ha incluido en el capítulo de biomasa, por lo que queda excluida en esta parte).

Aunque las primeras observaciones de reacciones fotoquímicas se remontan a los principios del siglo XIX, su utilización no es tecnológica y económicamente factible hasta el momento, además estos sistemas junto con los termiónicos son los menos estudiados de todos los sistemas solares.

Su principio de operación se basa en el principio físico de que las moléculas que absorben radiación (en este caso solar), incrementan de manera instantánea su energía lo cual puede producir cambios químicos. Por otro lado si las reacciones que se producen son del tipo endotérmico, los productos que se obtengan de la misma tendrán una mayor energía que los reactantes, por lo que en el caso de la energía solar se habrá transformado a energía química, la cual es susceptible de utilizarse posteriormente como combustible.

Las reacciones fotoquímicas endotérmicas pueden ocurrir únicamente en la región ultravioleta, en la región visible o en la región infrarroja del espectro electromagnético, por lo que resulta interesante el desarrollo de sensibilizadores para cada una de las regiones.

Las eficiencias de conversión logradas hasta la fecha, aun son muy pequeñas, por lo que los costos para generar energía ya sea química o eléctrica son todavía muy altos.

Las principales tecnologías fotoquímicas para el aprovechamiento de la energía solar son: Fotoelectrosíntesis, que produce energía química y en la que se han logrado eficiencias de entre 6 y 14%; celdas fotovoltaicas electroquímicas, que junto con las anteriores son las más estudiadas hasta el momento, producen energía eléctrica, y se han logrado eficiencias también de entre 6 y 14%; celdas fotogalvánicas o fotogalvanovoltáicas, que producen energía eléctrica, pero que tienen las eficiencias más bajas de todas las tecnologías fotoquímicas (menor a 0.030%); sistemas microheterogéneos redox, con eficiencias de hasta 0.2%; y la biofotólisis, con eficiencias menores al 0.8%.

Sistemas Termiónicos: Este fenómeno lo observó por primera vez el francés C. Du Fay, a mediados del siglo XVIII, y consiste en convertir la energía calorífica directamente en electricidad, aprovechando la emisión de electrones de una superficie o cátodo caliente, los electrones viajan a través del vacío o de un espacio gaseoso hacia un ánodo frío o colector, por lo que si se conecta una carga eléctrica entre el cátodo y el ánodo, se puede obtener energía eléctrica.

Estos sistemas también conocidos como termiónicos, se han utilizado en los proyectos espaciales desde mediados de la década de los 50. Sin embargo, se estima que hasta antes del año 2000 no alcanzarán un nivel de desarrollo que los pueda convertir en sistemas generalizados en el mundo.

Hay que mencionar que al hablar de sistemas solares, la eficiencia no debe ser el único parámetro a considerar, ya que existen otros como su facilidad de implantación, costos, aceptación social, etc que pueden favorecer o no la conveniencia de utilizar -- tal o cual sistema.

Por lo que respecta a México, es muy importante mencionar que por su situación geográfica es uno de los países con mayor insolación en el mundo, lo cual permite pensar que podría tener grandes posibilidades dentro de varios, de los campos de la energía solar (tal vez de manera primordial en los sistemas termodinámicos pasivos, termodinámicos estacionarios y en los sistemas fotovoltaicos).

En la actualidad algunas instituciones como los Institutos de Ingeniería y de Materiales de la UNAM; de Investigaciones eléctricas; y el politécnico, desarrollan investigaciones del más alto nivel en este campo.

g) Recursos Eólicos.

La energía eólica o de los vientos, en realidad consiste en un aprovechamiento indirecto de la energía solar, ya que se debe a -- las diferencias de presión que se generan por el calentamiento no uni -- forme del sol sobre la atmósfera terrestre, y a las irregularidades -- sobre la superficie de la tierra.

Aunque solo un 2% de la energía solar que llega a la tierra se convierte en forma natural en energía cinética (aproximadamente -  $3.5 \times 10^{12}$  kw), esta cantidad resulta de todas maneras bastante impor -- tante, sin embargo solo una fracción muy pequeña de ese 2% es suscep -- tible de aprovecharse de manera útil, ya que una gran parte de los -- vientos de mayor velocidad se dan en zonas montañosas altas con den -- sidades sumamente bajas de población, o mar adentro en los océanos.

La Organización Meteorológica mundial ha estimado que un -- poco menos del 1% de la energía eólica total podría aprovecharse en -- lugares propicios alrededor de todo el mundo.

Debe tenerse en cuenta, además, que técnicamente no es po -- sible aprovechar toda la energía del viento, ya que como demostró el -- científico Betz en 1927, una turbina eólica ideal solo puede captar -- el 59.3% de la energía incidente hacia ella, por limitaciones físicas.

Se ha estimado que el potencial técnicamente utilizable es -- del orden de, máximo,  $3 \times 10^{13}$  kwh anuales.\*\*

\*\* VIQUEIRA, Landa Jacinto.  
Apuntes de la Materia Energía y Desarrollo Económico.  
Maestría en Ingeniería Energética, DEPEF1, UNAM. 1985.

La evaluación de la energía eólica tiene semejanza con la evaluación del potencial hidroeléctrico. En ambos casos se trata de un flujo que debe ser cuantificado espacial y temporalmente, que presenta sitios de aprovechamiento óptimo, y cuya viabilidad técnico-económica depende también de muchos otros factores externos que condicionan su potencial aprovechamiento.\*\*

El volumen de escurrimientos en una cuenca determinan un Potencial Bruto de Superficie. El contenido energético del viento en superficie sobre al área de interés, y el número y la configuración topológica del conjunto de Sistemas Conversores de Energía Eólica (SCEE) que esa área puede contener, determinan el Potencial Eoloenergético Bruto de Superficie (PEEB) susceptible de ser explotado.

La metodología para convertir el potencial energético del viento en Potencial Eoloenergético Bruto de Superficie, para un determinado sitio, se basa en la determinación de una sección teórica acumulada en el plano vertical en  $m^2$  que define un área útil de aprovechamiento del viento, para una extensión dada de terreno. Esto permite convertir la densidad de energía del viento dada en  $KWh/m^2$ -año, en energía media aprovechable para el sitio en  $GWh/año$ , o sea, su PEEB.

\*\* CALDERA, M. E.; SALDANA, F. R.  
Evaluación Preliminar del Potencial de Generación Eléctrica en la Zona de la Ventosa, Oaxaca.  
IIE, División Fuentes de Energía, Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía. Abril de 1986.

Generalmente el contenido energético del viento es mayor entre mayor sea la altura sobre la superficie terrestre (debido al efecto de rugosidad del terreno)\*\*; pero por limitaciones de tipo tecnológico y económico, en la actualidad únicamente el viento que circula en los primeros 150 m sobre el nivel de la superficie es aprovechable.

Aunque en base a lo anterior debería ser deseable la utilización de altas torres en el aprovechamiento de la energía del viento, actualmente la tendencia es utilizar grupos de turbinas eólicas en torres de 20, 30 y 40 m de altura, en lugar de grandes turbinas y altas torres (60, 80, 100 m) debido a factores de índole técnico y económico.

La potencia que se puede obtener de los sistemas eólicos es proporcional al cubo de la velocidad del viento, esto es, si se duplica la velocidad del mismo, la potencia aprovechable se verá aumentada en ocho veces. Esta potencia está dada por la siguiente ecuación:

$$P = 0.5 \rho A V^3$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire en  $\text{Kg/cm}^3$ , A es el área de la sección considerada, y V es la velocidad del viento.

\*\* El contenido energético del viento no siempre es mayor con la altura ya que, por ejemplo, la densidad del aire disminuye con dicha altura. Por otra parte debe recordarse que aunque el contenido energético del viento depende de su velocidad, esta puede ser modificada, de manera significativa, por factores topográficos.

Dada la relación directamente proporcional entre la potencia aprovechable por un sistema eólico y la velocidad del viento incidente sobre el, y debido a la naturaleza variable del viento; estos sistemas presentan un comportamiento variable en el tiempo, y aun en el espacio. Esta variabilidad puede ocurrir durante intervalos de segundos (ráfagas), minutos (variaciones de potencia), horas (ciclos-díurnos), y meses (variaciones estacionales).

En zonas geográficas relativamente cercanas pueden darse variaciones relativamente importantes en el porcentaje promedio de la velocidad del viento debido a los efectos del terreno (montañas, valles, efectos de embudo, contornos de la tierra, etc) y al calentamiento desigual de la tierra (costas, grandes lagos, bosques, etc).

Las velocidades de viento promedio anuales en el mundo varían de menos de 0.25 m/seg (9 Km/hr) en algunas zonas, a cerca de -- 9 m/seg (32 Km/hr) en regiones montañosas y costeras.\*\*

De lo anterior puede deducirse que la selección del sitio en que habrá de instalarse el sistema eólico será muy importante.

En la figura I.24 se muestra la energía disponible del viento, obtenida por la Organización Meteorológica Mundial. Las islas, costas, colinas y áreas cercanas a lagos y mares, representan los vientos con mayor potencialidad.

\*\* También existen altas velocidades en lugares influenciados por vientos de altura cuando sus efectos se suman con los efectos locales.

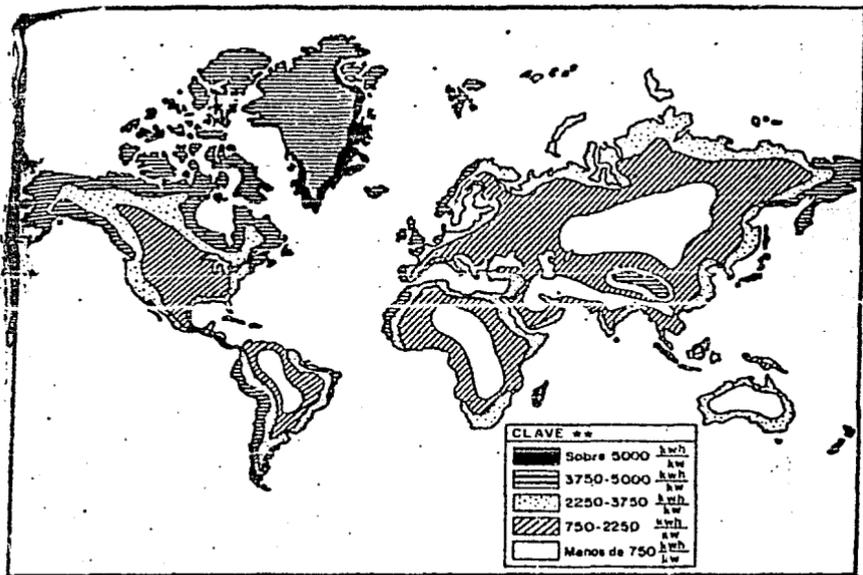


FIGURA I.24) Energía del viento disponible. Mapa de la Organización Meteorológica Mundial.

\*\* Como Referencia: Si el viento soplara constantemente durante todo el año a una velocidad igual a la nominal de diseño, por cada KW--de capacidad instalada se obtendrían 8760 kwh/año.

Fuente: Aeroenergación de Energía, Serie de Documentos OIADE, No. 23, Quito, Ecuador. Noviembre de 1981.

Si bien es cierto que para el aprovechamiento potencial de la energía eólica se necesitan vientos de cierta velocidad, actualmente existen turbinas eólicas comerciales que pueden empezar a producir energía con vientos de solo 4 m/s, y aunque es deseable que los vientos sean más o menos constantes, existen lugares con vientos de tipo local, que aunque durante la mayor parte del día son de poca intensidad, durante unas cuantas horas pueden producir grandes cantidades de energía y satisfacer necesidades específicas. En muchos lugares del mundo, por ejemplo, la velocidad del viento tiende a incrementarse por las tardes y al anochecer, que generalmente son las horas de demanda pico de energía, por lo que la energía eólica podría ser una gran ayuda en el suministro de energía durante esas horas.

Por sus características la energía del viento será mejor utilizada cuando:

- a) Se interconecte con otras plantas de potencia, pudiendo substituir el consumo de combustibles fósiles.
- b) Se le utilice en conexión con alguna forma de almacenamiento de energía, como baterías. Esto deberá estudiarse previamente, ya que el costo del almacenamiento es uno de los más altos de los sistemas eólicos, de ahí que entre mayor sea la correlación entre la curva de demanda de energía y la disponibilidad de vientos, más económico será el aprovechamiento de la energía del viento porque reducirá la capacidad requerida de sistemas de almacenamiento.

\*\* El alto costo de los sistemas de almacenamiento no es privativo de los sistemas eólicos, sino de cualquier sistema de generación eléctrica, sea convencional o no convencional.

La utilización de la energía eólica se remonta a épocas muy remotas, y junto con la biomasa (particularmente con la madera; el carbón vegetal; y algunos desechos agrícolas, forestales y animales) constituyen probablemente las únicas fuentes de energía renovables que se han utilizado de manera efectiva y constante desde mucho tiempo atrás.

Hace más de 3,000 años, los egipcios navegaban ya con embarcaciones de vela propulsadas por la energía del viento; esta forma de transporte alcanzó su apogeo en el siglo XIX, para después declinar de manera abrupta debido a la llegada de las máquinas de vapor.

El uso de los molinos de viento es muy antiguo, ya que hace 2,000 años, los utilizaban ya los persas y los Chinos, aunque su empleo era más difundido entre los griegos. Es probable que fueran introducidos a Europa por los árabes, durante el siglo XII.

Para el siglo XIII su uso era ya muy común en toda Europa y eran empleados muy ampliamente en la molienda del grano, el bombeo de agua y la operación de diversas máquinas. También eran usados comúnmente en la región del Caribe para la trituración de la caña de azúcar.\*\*

A principios del siglo XIV se desarrollaron en Francia los molinos de torre, en los que las aspas eran sostenidas en la parte superior de una torre por una cúpula móvil, misma que podía girar sobre un eje vertical para que las aspas pudieran enfrentar la dirección de los vientos dominantes todo el tiempo. En el siglo XV, los molinos de viento y de agua eran ya la más importante fuente de energía, como complemento a la fuerza humana y animal.

\*\* Report of the Technical Panel on Wind Energy. ONU. (1981).

En el siglo XVI se usaban en China molinos de viento de tipo horizontal para producir sal común, evaporando agua de mar. Para el siglo XVII la tecnología de los molinos de viento había alcanzado un grado de desarrollo bastante alto, teniendo los holandeses la supremacía tecnológica, estimándose que entre los ingleses con más de 10,000 molinos de viento de entre 10 y 20 HP (110 MW) y los holandeses con más de 12,000 molinos (125 MW), había más de 235 MW instalados.

En 1745 el inglés E. Lee inventó la cola del ventilador, que sirve para que las aspas del molino modifiquen automáticamente su posición a fin de colocarse siempre perpendiculares a la dirección del viento, con lo que se maximiza la energía obtenida. Para fines de ese siglo los holandeses tenían instalados cerca de 20,000 molinos de aproximadamente 20 KW cada uno, para una potencia total de 400 MW.

Por ese entonces se empiezan a expandir las utilizaciones de la energía eólica a otros usos como en los aserraderos y en la industria del papel.

Es en el siglo XIX cuando la energía eólica alcanza su máxima utilización, misma que empieza a declinar a mediados de dicho siglo debido a la aparición de las máquinas de vapor. A finales del mismo los daneses tenían ya el liderazgo tecnológico en el área debido más que nada a su carencia de combustibles fósiles, estimándose que para entonces tenían instalados más de 100,000 molinos de viento (con cerca de 1,000 MW).

Durante el siglo XIX se construyeron cerca de 6 millones de molinos de viento en Estados Unidos, pero nuevamente se cayó en el engaño de la energía barata que tanto ha dañado a la humanidad, por lo que su uso decayó, a pesar de ello se estima que actualmente todavía funcionan 150,000 de los mismos.

Sin embargo, la utilización de la energía eólica a fin de producir electricidad, no se dio sino hasta fines del siglo XIX y principios del presente. El primer aerogenerador\*\* de energía eléctrica lo diseñó Paul LaCour en Dinamarca, entrando en operación en 1890, esto es, muy poco tiempo después que el primer generador eléctrico de vapor.

Para 1916 Dinamarca contaba ya con más de 1,300 aerogeneradores con una generación de energía eléctrica de 500 millones de KWH/año.

Mientras que en Estados Unidos los molinos de viento con molinos de 0.5 KWe eran prácticamente la única fuente de energía eléctrica disponible en las zonas rurales, hasta antes de su programa de electrificación rural llevado a cabo durante la década 1930-1940.

Una variedad en la utilización de los molinos de vientos, la constituyen los molinos no de aspas, sino de velas utilizados en el Mediterráneo, particularmente en Creta; y en Tailandia.

\*\* Aerogenerador: Sistema conversor de energía eólica, incluyendo los elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos requeridos para la generación, control y sincronización de energía eléctrica.

El primer gran generador eólico lo construyó la Unión Soviética en 1931, cerca de Yalta en el Mar Negro, con aspas de 30.5 m de diámetro y una torre de 23 m de altura, con una capacidad de generación de 100 Kwe. Desde entonces se han construido muchos más por parte de países interesados en el desarrollo de esta fuente entre ellos se pueden incluir además de Holanda, Dinamarca, Estados Unidos, Canadá e Inglaterra, a la Unión Soviética, Francia, Alemania, Suecia, y Bélgica entre otros.

Aunque la investigación sobre la energía eólica ha continuado siempre en varios países, los bajos precios de los hidrocarburos durante los años 1950-1970 hicieron que esta decayera, al igual que su uso. Sin embargo, y de la misma manera que con las otras fuentes de energía no convencionales, el interés por la misma volvió a crecer a partir de las crisis energéticas de los años 70.

La energía cinética del viento se puede convertir en energía mecánica rotacional en forma directa, cuando la energía del viento se extrae por medio de superficies que están en contacto directo con el viento y acopladas a rotores mecánicos, o de forma indirecta cuando interviene un elemento intermedio para su conversión: A su vez, la energía mecánica rotacional se puede convertir en energía eléctrica o térmica.

En la actualidad las aplicaciones de interés corresponden todas a aprovechamientos directos.

La energía eólica tiene 2 aplicaciones principales, la primera consiste en la conversión de la misma en energía mecánica (aerogeneradores) y la segunda en energía eléctrica (aerogeneradores).

La conversión de la energía eólica en energía mecánica puede tener muchos usos, como la realización de trabajo directo en la molienda de granos, aserrado, extracción de aceites comestibles; bombeo de agua; desalinización de productos salados o del agua de mar; transporte marino, ya que muchos países como Japón, Inglaterra e Irlanda del Norte tienen amplios programas a fin de aumentar el uso de la energía eólica como fuente de energía para el transporte marino; o para agitar agua y otros fluidos para producir calor a bajas temperaturas, dicho calor puede utilizarse para la calefacción de hogares o para proporcionarles agua caliente, calentamiento o secado de granos y productos agrícolas y para sistemas de refrigeración (por absorción amoníaco-agua), entre cuyas aplicaciones se pueden tener la preservación de medicinas y de alimentos en áreas remotas o rurales.

En el caso particular de los sistemas eólicos para el bombeo de agua, se utilizan aerobombas, acopladas a la aeroturbina, las cuales son generalmente de desplazamiento positivo o centrifugas, -- habiendo en la actualidad más de 1 millón de aerobombas en el mundo, la mayoría con el fin de abastecer de agua a las casas o de almacenarla. Estas se encuentran básicamente en Estados Unidos, Australia y Sudáfrica.

Las aeroturbinas se pueden clasificar en dos grandes grupos que son:

a) Las de eje horizontal, que pueden tener una, dos, tres o más aspas. Entre mayor sea el número de estas, la superficie de -- contacto con el viento será mayor. Se denomina solidez a la razón -- entre la superficie en contacto del viento y el área barrida por las aspas de la aeroturbina. Así, a mayor solidez, menor velocidad de giro y mayor par de arranque, obteniéndose un mayor par de arranque con velocidades bajas, las aeroturbinas de alta solidez son las preferidas para el bombeo de agua. La eficiencia de las aeroturbinas de eje horizontal anda por el orden de 30 al 40%, esta última se ha obtenido con aeroturbinas de dos aspas que por otra parte son las -- preferidas para los grandes generadores que a su vez se utilizan en la generación de electricidad. Conforme aumenta la solidez de la aeroturbina (su número de aspas), la eficiencia disminuye. Por -- otro lado, desde mediados del presente siglo, se le ha dado una --- gran importancia al desarrollo de los sistemas de poca solidez, debido a que tienen mayores eficiencias que los de alta solidez, por lo que se les utiliza en la producción de electricidad en la que no se requieren grandes pares de arranque. La eficiencia de los sistemas de alta solidez es del orden del 20 al 30%, mientras que la -- de los de baja solidez, sobrepasa el 40%.

b) Las de eje vertical, que presentan algunas ventajas sobre las anteriores debido a que no requieren, para la generación de energía eléctrica, sistema de orientación, ni mecanismos de control para regular la inclinación de las aspas, aunque por lo mismo estas no siempre presentan la mejor orientación con respecto al viento. La eficiencia de este tipo de aeroturbinas va de un 15 a un 35%.

Por lo que toca a la conversión de la energía eólica en energía eléctrica, esta se realiza a través de aerogeneradores, y su futuro depende de una serie de factores técnicos y políticos, como del precio de los hidrocarburos.

Los Sistemas Conversores de Energía Eólica (SCEE), cubren en la actualidad una amplia gama de capacidad de generación, la cual varía del orden de unos kilowatts, hasta varios megawatts; y pueden encontrarse instalados en forma aislada o en grandes concentraciones (parques), interconectados a líneas de transmisión y distribución.

Estos sistemas están diseñados en base a modernos materiales y avanzado diseño aerodinámico, utilizando generalmente para su control microprocesadores que les permiten operar de manera autónoma.

Los Sistemas Conversores de Energía Eólica se pueden clasificar en base a su potencia de salida en:

- Baja Potencia (hasta 100 KW)
- Mediana Potencia (100-200 KW)
- Media-Alta Potencia (200-1,000 KW)
- Alta Potencia (1-5 MW)

Los sistemas de baja potencia tienen un mercado disperso pero muy bueno, y se les puede utilizar en residencias rurales para satisfacer las necesidades eléctricas; en determinados equipos de la agricultura; o en zonas muy remotas donde suelen competir con los generadores diesel pequeños. Por lo general se trata de pequeños aerogeneradores de eje horizontal, que producen tanto corriente directa como alterna, y su eficiencia anda por el orden de un 30 a un 40%.

Aunque su utilización data de los 30, fueron desplazados -- por las compañías eléctricas debido a los bajos precios de los hidrocarburos, actualmente su uso ha cobrado un renovado interés sobre todo en los Estados Unidos donde el concepto de granjas eólicas "Wind-Farms" esta de moda. En el Estado de California se tienen instalaciones (a 1985), 13,189 aerogeneradores con una capacidad de 1,028 MW, representando el 98% de la capacidad total instalada en los Estados Unidos de aerogeneradores de baja potencia, teniéndose planeado tener una capacidad de 4,000 MW en aerogeneradores eólicos en los EUA para el año 2,000,\*\* lo cual evitará el consumo de 40 millones de barriles de petróleo al año.

\*\* ASE, Alternative Sources of Energy.  
The Magazine of the Independent Power Production Industry.  
Num. 79, March 1986.

Los generadores de potencias media, media-alta y alta, son de desarrollo reciente (a partir de los años 70) y su fin principal consiste en la interconexión con las redes eléctricas de transmisión ya existentes, eliminándose así los altos costos de almacenamiento, aunque pueden utilizarse también para satisfacer las necesidades de electricidad de localidades o usuarios aislados donde no existan líneas de distribución, además en algunos casos se pueden acoplar a sistemas de generación diesel con lo que se logra aumentar la continuidad del sistema.

La tendencia actual para los generadores de media, media-alta y alta potencia parece inclinarse hacia la construcción de centrales fotoeléctricas, que son un conjunto de Sistemas Conversores de Energía Bólica, interconectados a un sistema de transformadores y líneas de distribución o transmisión que suministran energía eléctrica a una red o sistema eléctrico, y que tienen la ventaja de requerir de un tiempo mucho menor de construcción que el que necesita una central convencional, además de poderse construir a base de módulos, lo que permite que una parte de la misma pueda empezar a operar aun cuando el resto no se haya terminado de construir.

En Estados Unidos existen ya 105 centrales de este tipo, la mayoría ubicadas en el Estado de California.\*\*

\*\* ASE, Alternative Sources of Energy.  
The Magazine of the Independent Power Production Industry.  
Num. 79, March 1986.

Existen diversos países como Estados Unidos, Dinamarca, Inglaterra, Bélgica, Suecia, Holanda, Noruega, Italia, Japón, Alemania, España, Suiza, Escocia, Canadá, Unión Soviética, Francia, Irlanda y Australia, entre otros, que tienen amplios programas en el área de la energía eólica. Además de que, por otra parte, la mayoría de ellos son también fabricantes. Algunos países de Sudamérica y Asia se encuentran desarrollando asimismo prototipos a fin de poder lograr en el futuro un amplio desarrollo dentro del área.

En la actualidad Canadá, Dinamarca, Suecia, Alemania, Inglaterra y Estados Unidos tienen en desarrollo aerogeneradores en diferentes niveles de investigación, desarrollo o construcción, todos ellos del orden de varios MW, con avanzada tecnología, y en su mayoría de eje horizontal.\*\* Resulta especialmente interesante el desarrollo en Alemania de un aerogenerador de 5 MW de una sola aspa; y los desarrollos en EUA de 2 aerogeneradores de 7.2 y 7.3 MW respectivamente que serán los más potentes del mundo.\*\*\*

\*\* Un aerogenerador de eje horizontal es aquel que obtiene su energía de espas sujetas a un eje común, que giran en un plano perpendicular a la dirección dominante del viento.

\*\*\* BORJA, Diaz Raul E. Grandes Sistemas Experimentales para la Conversión de Energía - Eólica en los Estados Unidos. Informe IIE/10/14/3467/124/P/VI. División Fuentes de Energía, Departamento de Fuentes No Convencionales. Noviembre de 1985.

Un caso muy interesante resulta ser el de Holanda, que tiene un programa tendiente a lograr una capacidad instalada, a través de la energía eólica, de 1,000 MW para 1995 y 2,000 MW para el año 2,000, lo cual la colocaría para ese entonces a la vanguardia en el área junto a los Estados Unidos.

Junto tradicionalmente se ha considerado a la energía eólica como una tecnología limpia, los sistemas eólicos en gran escala, al igual que cualquier otro sistema de gran magnitud, pueden -- causar algunos efectos negativos, entre los que se tienen:

- Interferencia a las Señales de Alta Frecuencia: Como las de radio, televisión y comunicaciones en general, esto se debe a que las aspas de la aeroturbina pueden reflejar las ondas electromagnéticas.

El nivel de interferencia dependerá de la geometría, material de construcción y velocidad de rotación de las aspas y principalmente de la dirección y distancia entre el transmisor y receptor con respecto al aerogenerador.\*\*

Para ser que las interferencias ocurren en un área de - 400 m alrededor de la aeroturbina, en el caso de las señales de muy alta frecuencia, y de hasta casi 5 Km en el caso de señales de ultra frecuencia, en este último caso los efectos más fuertes se dan en los primeros dos kilómetros. Es por ello que para los sistemas de comunicación y televisión que utilizan repetidores, deberá establecerse un área prohibida para aerogeneradores basada en los niveles mínimos de interferencia que puedan afectar el funcionamiento de la estación repetidora.

\*\* BORJA, Diaz Raul E.  
Consideraciones sobre Interconexión de Aerogeneradores a Circuitos de Distribución.  
Informe IIE/10/14/3467/121/P/V1. División Fuentes de Energía, -  
Departamento de Fuentes No Convencionales. S/P.

Los problemas de interferencia son relativamente fácil de eliminarse, teniendo más cuidado al elegir el sitio de instalación de la aeroturbina; utilizando turbinas de baja solidez; y substituyendo las aspas de metal por aspas de madera o de fibras sintéticas.

- **Ruido:** Producido por los aerogeneradores, este puede ser audible o infrasónico, y podría llegar a causar molestias y disturbios en la vida animal y humana. Aunque los niveles de ruido y su impacto ambiental no han sido bien medidos, se estima que a una distancia de 150 o -- 250 m de la torre ya no representan ningún problema.

Se ha encontrado, por ejemplo, que el ruido producido por una máquina de 1 MW es de 64 db, solo 7 db mayor que el producido por una línea de transmisión de 765 KW, y se estima que a aproximadamente 250 m el ruido será prácticamente inaudible.\*\*

En general los aerogeneradores son bastante silenciosos y los problemas que pudieran crear por este motivo, son fáciles de solucionar en base a cambios en las velocidades de rotación (RPM), y pequeñas mejoras en los diseños y detalles de la torre y las aspas.

- **Efectos en la Vida Natural:** Existe la posibilidad de choques de las aves contra la torre y principalmente con las aspas, por lo que no debe dejar de tomarse en cuenta, principalmente si en la zona existen grandes poblaciones de aves o por ahí pasan migraciones de las mismas. Es posible también que se perturbe el vuelo nocturno-

\*\* BORJA, Diaz Raul E.  
Consideraciones sobre Interconexión de Aerogeneradores a Circuitos de Distribución.  
Informe IIE/10/14/3467/I21/P/VI. División Fuentes de Energía-  
Departamento de Fuentes No Convencionales. S/F.

de los pájaros o que sean atraídos por las luces colocadas en la parte superior de las torres. Sin embargo la experiencia de años ha demostrado que dichos efectos son muy raros, además la relativa-baja velocidad de las aspas parece ser suficiente para avisar a las aves de la presencia de las turbinas, de hecho las torres y turbinas eólicas representan mucho menos peligros que las torres de radio o televisión.

- Otros Efectos: Existen otros efectos de menor importancia que los anteriores, como la probabilidad del rechazo social de las aerogeneradoras, en especial en los grandes sistemas, debido a su falta de estética; efectos de microclima que se estiman semejantes a los de un pequeño grupo de árboles; el uso de la tierra, que no es muy grande, ya que una turbina de gran escala ocupa aproximadamente  $2,000 \text{ m}^2$  además de que la tierra puede seguir utilizándose con fines de agricultura y casi no será afectada, excepto por los caminos de acceso y las líneas de transmisión; la posibilidad de que grandes trozos de hielo formados en las aspas puedan ser lanzados a la velocidad de las mismas; otro peligro potencial que si podría ser de mayor importancia, consiste en la probabilidad de que un fragmento de las aspas o incluso una aspa completa pudiera desprenderse y causar algún accidente, como consecuencia de alguna tormenta, ciclón, etc., si bien la posibilidad no es muy grande, no debe dejar de tomarse en cuenta; Debe preverse también la posibilidad de derrumbe de la torre, que puede ser en cualquier dirección, por lo que debe establecerse un área de seguridad de por lo menos la altura de la torre.

Se ha experimentado que la máxima distancia que podría viajar un aspa que se desprende de un rotor girando a 40 RPM, es de 170 m aproximadamente.

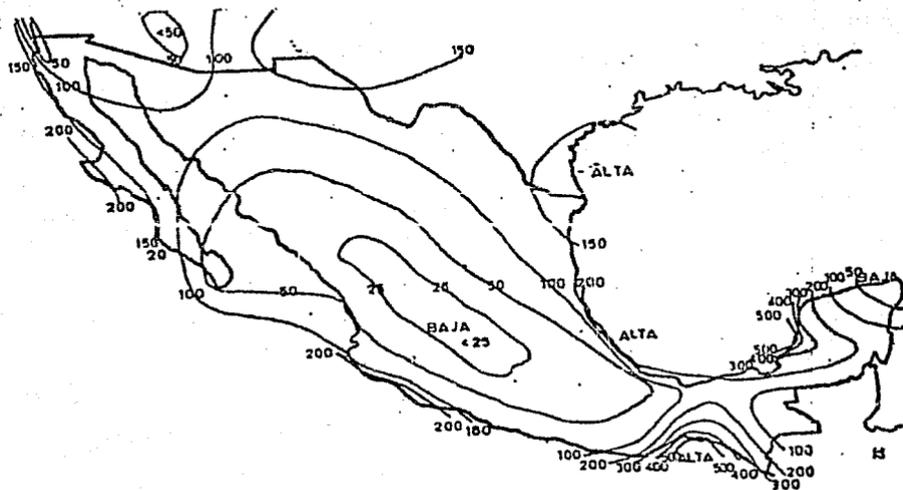
Por lo que respecta a México, su potencial eólico es prácticamente desconocido, la mayoría de la información proviene de 87-observatorios meteorológicos y 3,480 estaciones climatológicas, considerándose como confiable únicamente la información de los primeros, sin embargo, dado que la mayoría de los observatorios no fueron concebidos pensando en el viento como fuente de energía, la información obtenida no es suficiente.

Los sistemas regionales más importantes son: la región-sur del Istmo de Tehuantepec, con velocidades medias del viento entre 6.5 y 8.5 m/s (resultando especialmente interesante la zona de la ventosa); las costas de Oaxaca, Guerrero y Michoacán, donde en ciertas horas de la tarde se alcanzan velocidades del viento entre 13 y 15 m/s; la Península de Baja California; y el Altiplano Central. En la figura 1.25 se muestra la potencia disponible media anual de energía eólica en la República Mexicana.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas ha estado estudiando desde 1977 la zona sur del Istmo de Tehuantepec, y ha determinado que la zona de vientos aprovechables para la generación de energía eléctrica es de más de 1,500 m<sup>2</sup>. Si se explotara la energía eólica en una superficie del 10% de la zona señalada, podría tenerse una central eoloelectrónica con una capacidad instalada del orden de 1,200 MW, los que operando con un factor de planta de entre 40 y 50% (se demostró que para la zona podría tenerse un factor de planta ajustado global del 40%) podrían producir de 4.2 a 5.3 TWh/año.

\*\* CALDERA, M. E.; SALDANA, F. R.  
Evaluación Preliminar del Potencial de Generación Eléctrica en la Zona de la Ventosa, Oaxaca.  
Instituto de Investigaciones Eléctricas, División Fuentes de Energía, Departamento de Fuentes No Convencionales. Abril de 1986.

FIGURA I.25) POTENCIA DISPONIBLE MEDIA ANUAL EN LA REPUBLICA MEXICANA.  
[W/m<sup>2</sup>]



Fuente: SANCHEZ, S. J. Distribución de la Energía del Viento en la República Mexicana., Memoria: Quinto Congreso Academia Nacional de Ingeniería, Morelia, Michoacán, 18-21 Septiembre de 1979.

El aprovechamiento actual de la energía eólica en México se limita a aerobombas de eje horizontal que se encuentran localizadas en localidades rurales del norte y sureste del país, y a algunos aerogeneradores<sup>\*\*</sup>, en ambos casos adquisición de tecnología norteamericana.

Aunque existen diversos centros educativos que recientemente han iniciado estudios dentro del área de la energía eólica, hay 5 instituciones que merecen destacarse por su labor en el área, estas son: El Instituto de Investigaciones Eléctricas, La Universidad Nacional Autónoma de México, La Unidad Atzacapotzalco de la Universidad Autónoma Metropolitana, la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del IPN, y el Grupo del Sol A.C.

El IIE se encuentra desarrollando actualmente un proyecto muy importante consistente en el diseño y construcción de un aerogenerador de 50 KW<sub>e</sub>.

h) Recursos Oceánicos:

Dentro de este concepto se incluyen los siguientes recursos:

Energía Térmica de los Océanos: Comúnmente conocida como OTEC (abreviatura en inglés de Ocean Thermal Energy Conversion),<sup>\*\*</sup> consiste en realidad en un aprovechamiento indirecto de la energía solar, y de todos los sistemas oceánicos es el que tiene mayor probabilidad de desarrollo a futuro.<sup>\*\*\*</sup>

La idea de aprovechar la diferencia de temperatura entre las aguas superficiales y las aguas profundas de los océanos, se remonta a cerca de un siglo. En la actualidad existen varios procesos para obtener energía eléctrica a partir de esta fuente, siendo el más común el que consiste en producir vapor en un flasher (evaporador) en condiciones de vacío, a partir del agua tibia superficial; posteriormente el vapor saturado se expande en una turbina de baja presión (que a su vez está conectada a un generador), y luego se condensa, utilizando para ello el agua fría proveniente del fondo del mar. Como subproducto de este proceso se produce agua pota

\*\* Otra manera de denominarla, aunque menos común, es la de CETO (Conversión de Energía Térmica de los Océanos).

\*\*\* Report of the Technical Panel on Ocean Energy. Third session, General Assembly, ONU, 1981.

ble, lo cual como se verá más adelante hace sumamente interesante - el proceso.

Las zonas con diferencias más notables de temperatura se encuentran en la zona comprendida entre los 30 °S y los 30 °N, siendo particularmente importantes las diferencias en los mares tropicales.

Sin embargo la ubicación de una planta de OTEC no puede basarse únicamente en lo anterior, ya que características particulares de las costas pueden disminuir los gradientes de temperatura, y por otra parte, en ciertos lugares como islas o costas muy aisladas o remotas, la utilización de la OTEC puede ser la solución más viable y económica.

Además la producción de agua fresca como subproducto (a parte de algunos otros productos), puede hacer variar notablemente la viabilidad de la OTEC, ya que en zonas como las anteriormente mencionadas, la producción con plantas de menos de 5 Mw, que podría pasar desapercibida para el sistema eléctrico, podría proporcionar cantidades considerables de agua fresca, de ahí que los subproductos, como el agua potable o la acuicultura, podrían llegar a ser incluso más importantes que la producción de electricidad.

Un total de 99 naciones o territorios en todo el mundo -- tienen posibilidades de desarrollo de la OTEC, con un gradiente mensual de por lo menos 20 °C en su zona económica exclusiva. De ellos 62 corresponden a países desarrollados de los cuales 25 tienen planeado tener instalados para el año 2,010 a través de la OTEC, -- 1,000 Mw.

El uso de la OTEC en países en desarrollo se estima que - será en plantas pequeñas (de menos de 10 Mw), las cuales empiezan- ya a ser competitivas con los generadores diesel, en ciertas zonas- como islas y costas aisladas.\*

La estimación de la capacidad total de energía eléctrica- capaz de generarse a través de la OTEC, varía entre 10,000 y 100,000 Mw, por lo que habrá que investigar más sobre el tema para poder - determinar la potencialidad real de esta fuente.

La utilización y aprovechamiento de la OTEC, deberá consistir en aplicaciones a larga escala, ya que se tiene la tecnología ne

\*\* Report of the Technical Panel on Ocean Energy.  
Third session, General Assembly, ONU, 1981.

cesaria para ello, de hecho no se cree que se necesiten grandes modificaciones a muchos equipos tradicionales para su aprovechamiento, ya que se utilizan intercambiadores de calor tradicionales (los cuales -- representan del 50 al 60% del costo total de las plantas de OTEC), -- que utilizan amoníaco como fluido de trabajo, construidos de titanio por la gran resistencia de este a la corrosión por amoníaco y agua de mar; las turbinas que se requerirían son más grandes que las existentes hasta ahora, aunque no se preveen grandes problemas técnicos para su desarrollo; el principal problema lo representan tal vez las tuberías submarinas, aunque este no se considera insoluble.

Hay que aclarar sin embargo, que su competitividad comercial a gran escala no ha sido demostrada hasta el momento.

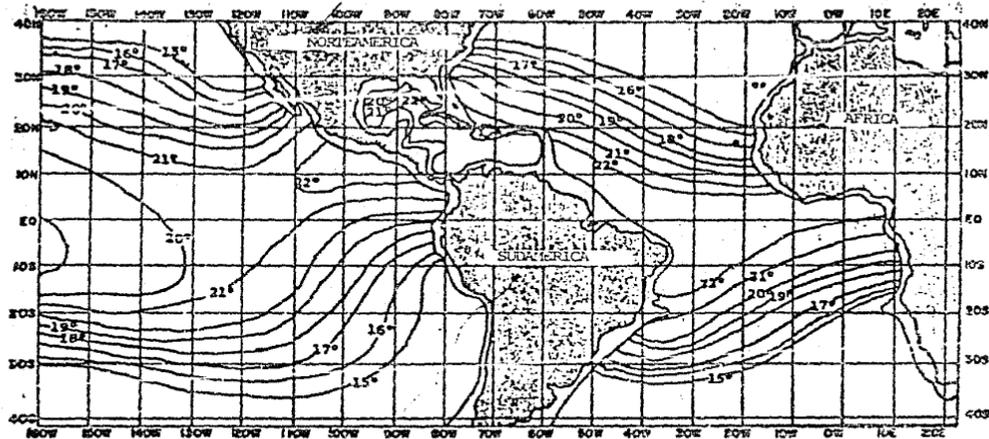
La OTEC es muy prometedora, tanto desde el punto de vista económico, ya que promete poder reemplazar prontamente al petróleo en la producción de electricidad; como desde el punto de vista técnico, porque presenta varias ventajas como:

- No requiere sistemas de almacenamiento de energía.
- Grandes unidades sin grandes problemas de impactos ambientales.
- Grandes posibilidades de desarrollo en un futuro cercano, ya que este no depende de ningún avance científico nuevo, sino de que se le dediquen los recursos y tiempo suficientes.
- Múltiples aplicaciones como la producción de agua fresca, acuicultura, productos químicos y orgánicos, etc.
- Accesibilidad para una infinidad de países de todos los continentes y de diversos grados de desarrollo.

Los factores más importantes al tratar de fijar las aplicaciones potenciales de la OTEC, son:

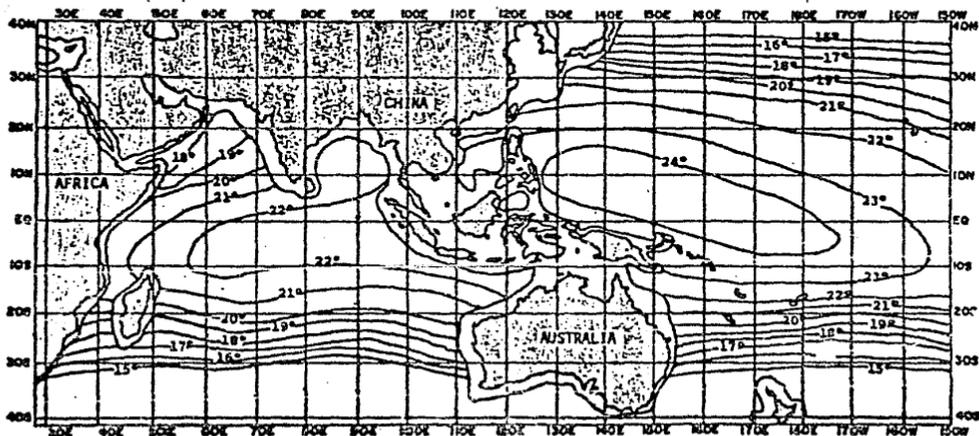
i) Factores Físicos: El más importante de ellos es la disponibilidad de recursos termales adecuados para su explotación. Se requiere de una diferencia de temperaturas de por lo menos 18 °C, entre las aguas superficiales (0-100 m) y las aguas profundas (900-1,110 m), además de que las aguas frías deberán pasar cerca de la costa. Mediante un ciclo Rankine abierto o cerrado se estima que se podría obtener una potencia de 0.5 W/m<sup>2</sup>. En las figuras I.26 y I.26-A, se muestran las primeras aproximaciones hechas por el grupo de la ONU que estudió la OTEC.

FIGURA 1.26)  $\Delta T$  (°C) ENTRE LA SUPERFICIE Y 1,000 m DE PROFUNDIDAD, PARA AMERICA Y AFRICA.



Fuente: Report of the Technical Panel on Ocean Energy. O.N.U. (1981)

FIGURA I.2GA)  $\Delta T$  (°C) ENTRE LA SUPERFICIE Y 1,000 m. DE PROFUNDIDAD, PARA ASIA Y OCEANIA.



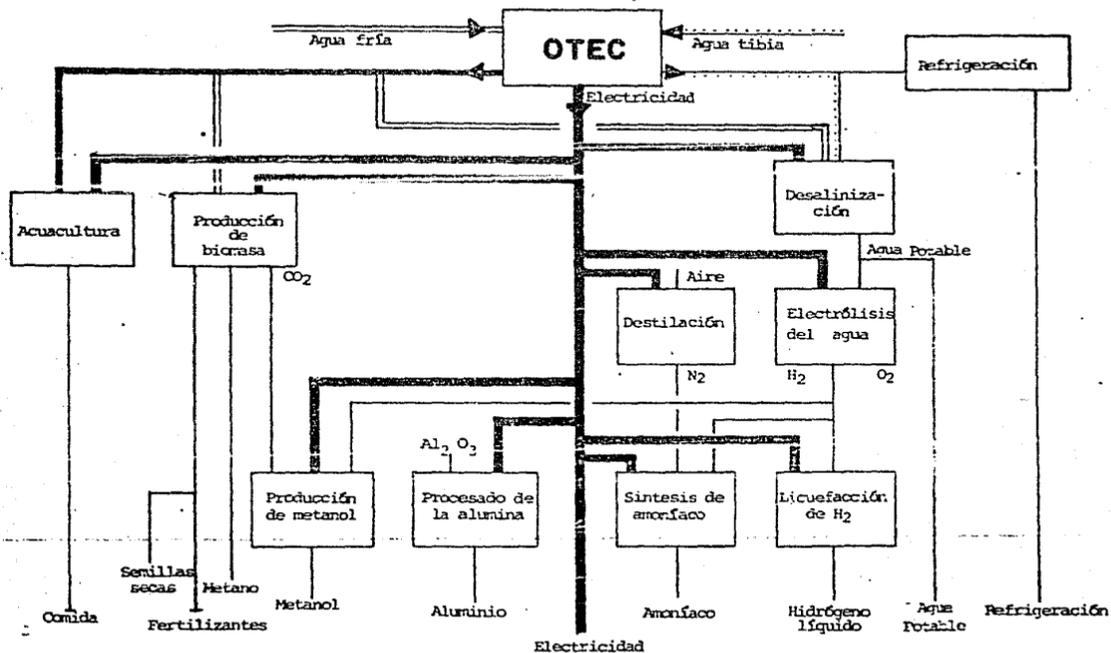
Fuente: Report of the Technical Panel on Ocean Energy, O.N.U. (1981)

Aunque las temperaturas son fáciles de medir "in situ", estas pueden variar debido a varios procesos físicos que alteran la estructura de la columna de agua, además de que las masas de agua se mueven constantemente de manera natural. Se requieren también otras características físicas, como el que las corrientes no sean extremadamente fuertes, ya que podrían afectar las estructuras y el equipo de explotación, además de que se requerirán condiciones meteorológicas especiales, ya que la presencia constante de fenómenos meteorológicos muy fuertes como ciclones, huracanes, etc. podría afectar también las instalaciones.

ii) Factores ambientales: Hasta el momento los estudios muestran una gran benevolencia ambiental de los sistemas de OTEC, sin embargo su desarrollo en larga escala podría traer algunos efectos ambientales, que no deben dejar de tomarse en cuenta, estos son: Cambios en las propiedades de los océanos, debido a la destrucción de organismos marinos, mezcla de las aguas oceánicas, y alteraciones climáticas locales; contaminación química, debido a la descarga de bióxido, fugas en los flujos de trabajo, y descarga de productos por corrosión; efectos estructurales, como arrecifes artificiales e impactos sobre viveros y migración de la fauna y flora marina.

iii) El tamaño de la planta: Este dependerá básicamente de la demanda de energía en la zona, hay que recordar que el recurso de la OTEC, es muy variable según el sitio donde se localice, y dependerá en una gran medida de condiciones locales particulares.

FIGURA I.27) FORMAS DE ENERGIA A PARTIR DE LA OTEC, Y SUS SUBPRODUCTOS



Fuente: Report of the Technical Panel on Ocean Energy. O.N.U. (1981)

iv) Uso final y subproductos: Como ya se mencionó, el recurso de la OTEC se puede transformar en energía eléctrica, química, de biomasa, etc, por lo que según el uso que se piense hacer de él se buscará el lugar de instalación ya que deberá pensarse en la instalación cercana de industrias que aprovechen los recursos de la OTEC. En la figura I.27 se muestran las diferentes formas de energía aprovechables de la OTEC, y sus subproductos.

Existen 4 configuraciones básicas para la explotación comercial de la OTEC, estas son: Plantas ancladas, que son relativamente estables, y se les puede usar en mares con profundidades de 500 a --- 1,000 m, su mejor rendimiento estaría en la producción de electricidad y/o subproductos, y su envío a las costas por cables y/o tuberías submarinas; Las plantas en la costa y en la plataforma continental, que son ideales cuando el recurso térmico se encuentra cerca de la --- costa, presentan la ventaja con respecto a la anterior de no requerir anclajes y cables de sostén, necesitar menos tubería y cable submarino, y estar menos expuestas a las variaciones en las condiciones climatológicas, además de tener una gran flexibilidad en el uso de la --- energía producida; finalmente las plantas-barco, las cuales no requieren de anclajes, y pueden obtener una mayor eficiencia de los gradientes térmicos oceánicos, no requieren tampoco de tubería de conexión --- ni cables submarinos con la costa, pero presentan la desventaja de --- que la energía obtenida debe utilizarse totalmente en procesos industriales altamente consumidores de energía, como la producción de amoníaco o de aluminio.

Para el caso de México, la utilización de la OTEC podría resultar atractiva principalmente en las costas del suroeste de la República donde se tienen gradientes de temperatura de hasta 22° C.

Energía de las Mareas: La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Fuentes de Energía Nuevas y Renovables, consideró a este recurso como el segundo en importancia de los oceánicos.

La energía de las mareas o mareomotriz, se crea debido principalmente a la atracción que ejercen la luna y el sol sobre el mar, esto se convierte en un movimiento que eleva y abate de manera alterna el nivel del mar.

La manera de utilizar estas mareas consiste en aprovechar la diferencia de alturas entre la pleamar y la bajamar, donde la pleamar es el momento en que se alcanza el máximo nivel, el cual se da a su vez durante el plenilunio o novilunio; y la bajamar es el momento en que se tiene el mínimo nivel, el cual se da durante el cuarto menguante y el cuarto creciente.

De ello se puede deducir que entre mayor sea la diferencia entre las mareas, mayor será la cantidad de energía que podrá aprovecharse, sin embargo su aprovechamiento queda limitado a regiones costeras donde las mareas alcancen amplitudes excepcionalmente grandes.

Un promedio de 5 a 12 metros de diferencia será necesario dependiendo de las condiciones particulares del lugar.

Existen cerca de 40 lugares en el mundo con estas condiciones, de los cuales en la mitad de ellos podría instalarse plantas con capacidad mayor a 200 MW, y solo en la otra mitad podrían instalarse plantas con más de 1,000 MW.

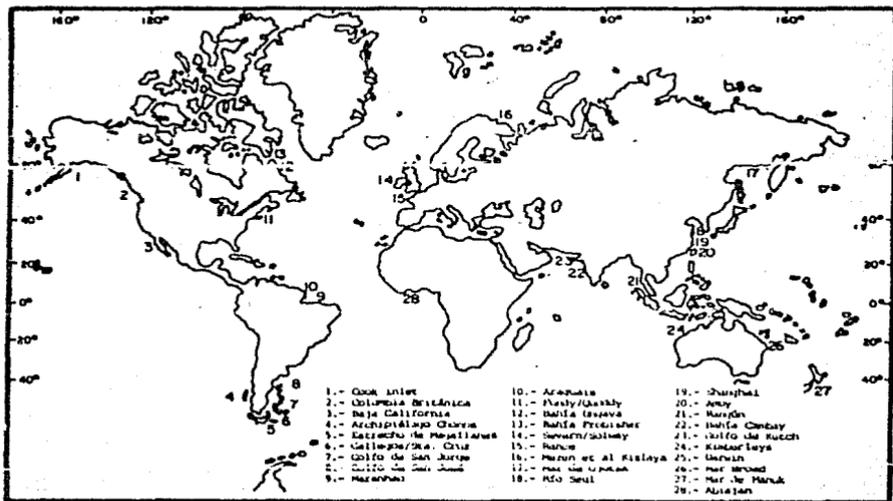
En la figura I.28 se muestran los principales sitios en el mundo con altas posibilidades para la instalación de una planta maremotriz.

Se estima que el potencial total con este tipo de plantas es del orden de 69,000 MW<sub>e</sub>, con una producción anual de energía eléctrica de 600 GWh.\*\*

El aprovechamiento adecuado de la energía de las mareas requiere de un almacenamiento de agua, el cual puede hacerse en una bahía, estero, depresión costera con condiciones que la puedan hacer a provechable, etc.

\*\* VIQUEIRA, Landa Jacinto.  
Apuntes de la Materia Energía y Desarrollo Económico.  
Maestría en Ingeniería Energética, D.E.P.F.I., U.N.A.M., 1985.

FIGURA I. 28) PRINCIPALES SITIOS CON POSIBILIDADES MARENÓTRICES



Fuente: Small Ocean Powered Schemes (1983).

Existen dos tipos de aprovechamiento de este recurso, a saber:

- Producir energía tanto en la pleamar como en la bajamar.
- Almacenar agua durante la pleamar, para producir energía solo durante la bajamar .

Aunque el potencial energético de las mareas es muy barato y renovable, su aprovechamiento ya no lo es tanto, ya que requiere de grandes obras de ingeniería, además de su limitación a las zonas costeras, siendo que no siempre se encuentran ahí las zonas industriales, lo que hace que se requieran líneas de transmisión que aumentan más los costos. Sin embargo su aprovechamiento en ciertas zonas costeras específicas, podría ser de gran ayuda en la diversificación de las fuentes de energía.

La energía maremotriz es ya una realidad, su uso se extiende a más de 20 años, con la instalación en 1966 de la planta de La Rance, en Francia; la cual produce cerca de 240 MW por este medio, existiendo además una planta experimental en el Mar de Kislaya, al norte de Murmansk, instalada por la Unión Soviética en 1969, y que produce 400 KW.

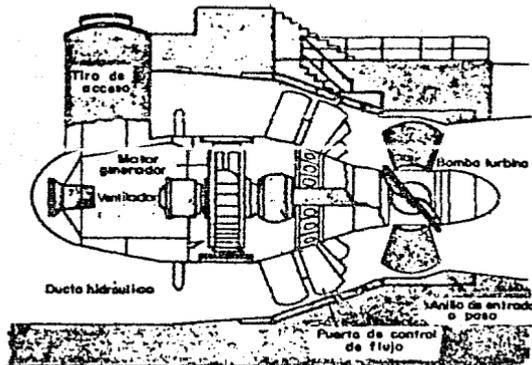
Existe un renovado interés en el mundo por las plantas maremotrices, lo cual se ha visto reflejado en los estudios realizados por diversos países como Canadá, Gran Bretaña, India, Corea, China, Suecia, Irlanda, Brasil y Australia entre otros, a fin de poner primero plantas experimentales y posteriormente comerciales para la producción de electricidad.

Actualmente Canadá está construyendo en Annapolis, en la bahía de Fundy, una planta experimental de 20 MW, este proyecto forma parte de uno más importante, a fin de explotar a futuro la totalidad del golfo de Maine. Resulta importante hacer mención que en la bahía de Fundy se presentan las mareas más grandes del mundo, las cuales llegan a alcanzar los 16 m en la primavera.

Por su parte China, instala actualmente otra pequeña planta experimental de 2 MW en la localidad de Jiangxia.

En la figura I.29 se muestra el esquema de una bomba-turbina de la planta maremotriz de La Rance, la cual está formada por 24 de estas unidades de 10 MW.

FIGURA I.29) BOMBA-TURBINA DE LA PLANTA MAREMOTRIZ DE LA-RANCE.



Fuente: Principles of Energy Conversion. (1979)

Si bien las plantas maremotrices no son contaminantes por sí mismas, si pueden tener algunos efectos colaterales, que en base a la magnitud de su uso podrían llegar a ser importantes, ya que ocasionan un completo cambio en las condiciones hidráulicas naturales de una gran área e interfieren con diversas actividades como la navegación, la pesca, etc. Por lo que estos puntos no se deben olvidar al pensar en las posibilidades de las plantas maremotrices.

Aunque las plantas maremotrices no puedan por el momento ser competitivas con las fuentes tradicionales de energía (investigaciones recientes parecen mostrar que su competitividad es bastante mayor de lo que se creía), en ciertos sitios muy particulares sí podrían serlo.

Se han hecho estudios preliminares para ver la factibilidad técnico-económica de micro plantas mareotricas, en zonas con diferencias en las mareas de menos de 5 metros, a fin de producir unos cuantos MW, que han mostrado que los costos son demasiado altos, lo que ha permitido llegar a la conclusión de que este tipo de micro plantas no se pueden justificar, salvo rarísimas excepciones en que el costo de producción de electricidad por otras fuentes sea más alto, o cuando formen parte de programas de gran envergadura que puedan incluir, por ejemplo, la acuicultura y el desarrollo de áreas costeras.

Por lo que respecta a México, parece haber dos lugares con altas probabilidads, que son: Punta Peñasco en Sonora, y la desembocadura del Río Colorado, ambos en el Golfo de California, sin embargo habría que hacer estudios más profundos para poder determinar con certeza su factibilidad.

Energía de las Olas: Esta consiste en realidad en un aprovechamiento indirecto de la energía eólica, la cual lo es a su vez de la energía solar. A este recurso se le conoce también con el nombre de OSWEC, - abreviatura en inglés de Ocean Swell and Wave Energy Conversion.

Las olas se producen por la fricción generada por el viento en la superficie de los océanos, mares y lagos. Su potencial global se ha estimado en alrededor del 1% de la potencia eólica global, es decir, cerca de 2 TW\*\*. Lo cual concuerda con lo obtenido por Isaacs y Seymour (1973), quienes estimaron dicha potencia entre 2.5 y 3 TW.

La energía potencial de las olas es 10 veces mayor que la de las mareas y el costo de su aprovechamiento parece ser muy inferior.\*\*\*

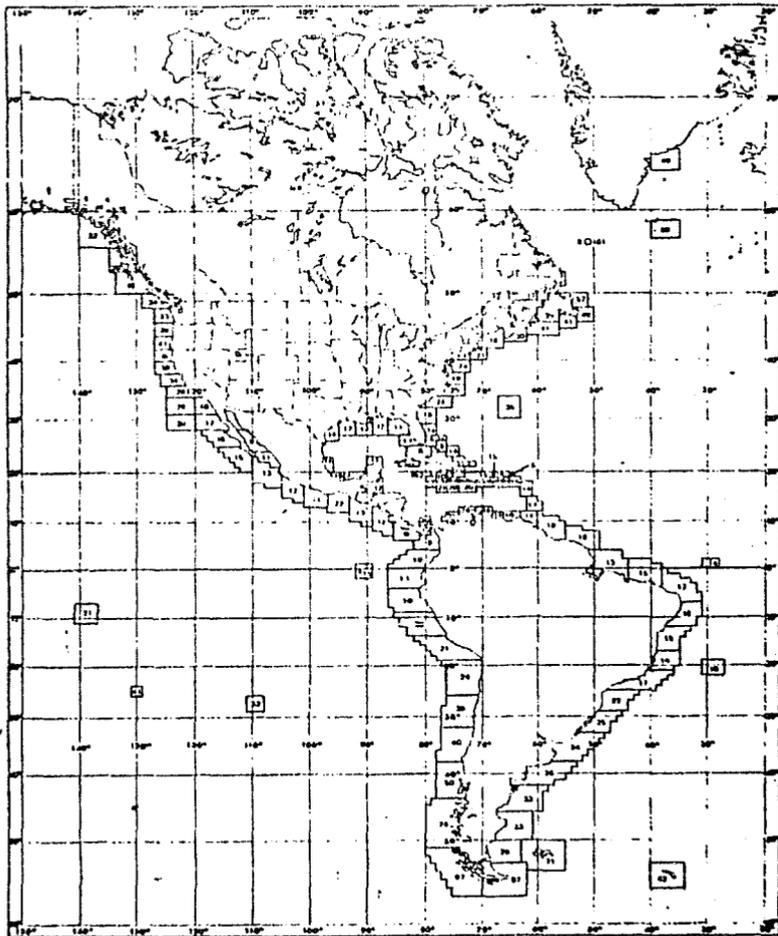
En las figuras 1.30, 1.31 y 1.32 se muestra el porcentaje -- promedio anual de energía de las olas en todo el mundo, en Kw por metro de frente de ola.

Puede apreciarse que los porcentajes más altos se dan en el Pacífico Norte, Atlántico del Este, y en las zonas costeras del sur de Australia, Nueva Zelanda, América y África.

\*\* VIQUEIRA, Landa Jacinto.  
Apuntes de la Materia Energía y Desarrollo Económico.  
Maestría en Ingeniería Energética, DEPEI., UNAM., 1985

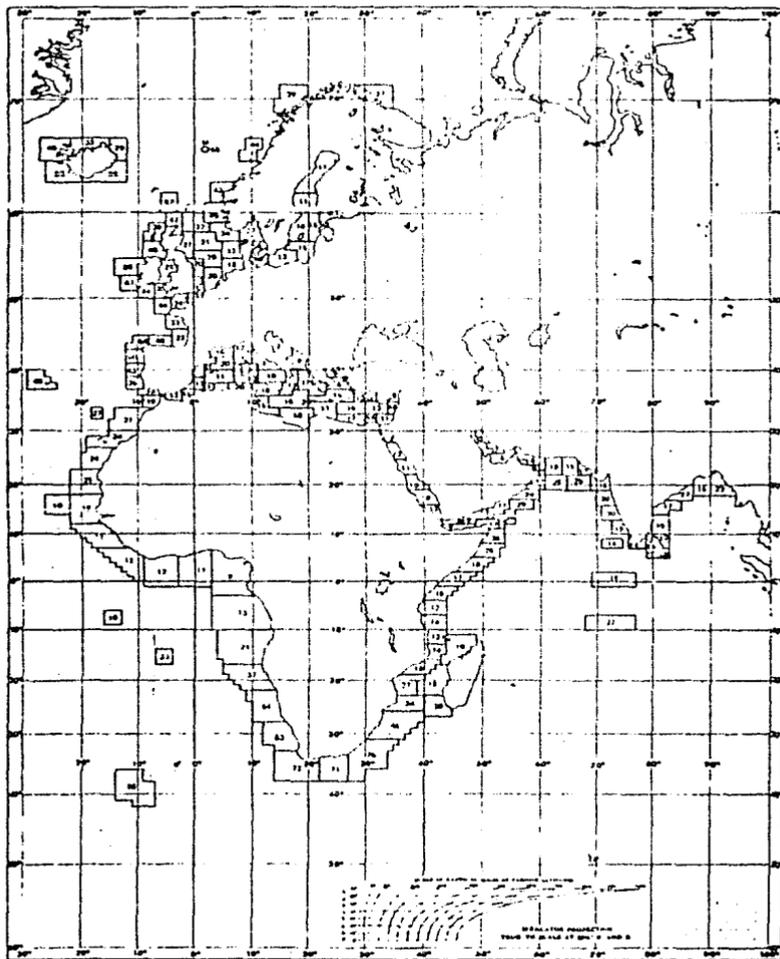
\*\*\* Cosmos. Gran Atlas Salvat.  
Los Recursos Naturales, Tomo IV, pag. 88  
Editorial Salvat, España., 1984

Figura 1.30) PROMEDIO ANUAL DE POTENCIA DE LAS OLAS (kW/M), EN COSTAS Y ÁREAS SELECCIONADAS MAR ADETRON DE NORTE Y SUD-AMERICA



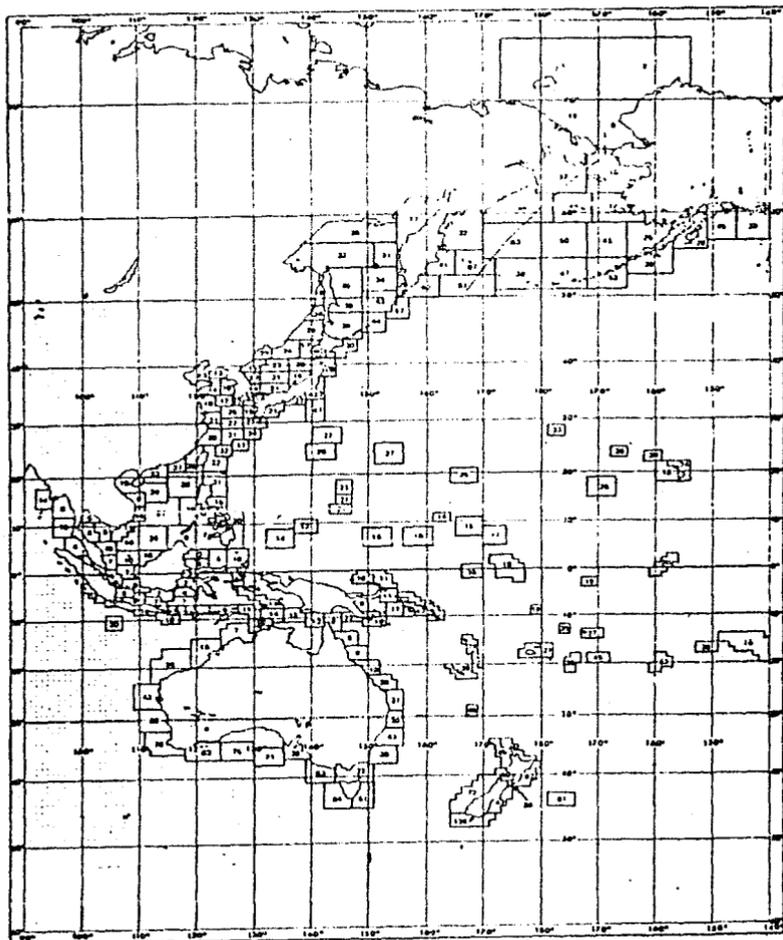
Fuente: Estimates of Coastal Deepwater Wave Energy Potential for the World (1981).

Figura 1.31) PROMEDIO ANUAL DE POTENCIAL DE LAS OLAS (H<sup>3</sup>/M), EN COSTAS Y ÁREAS SELECCIONADAS MAR ADETRÁS DE EUROPA, AFRICA Y SURESTE DE ASIA.



Fuente: Estimates of Coastal Deepwater Wave Energy Potential for the World (1981).

Figura I.32) PROMEDIO ANUAL DE POTENCIA DE LAS OLAS (KW/M), EN COSTAS Y AREAS SELECCIONADAS MAR ADENTRO DE ASIA DEL ESTE, AUSTRALIA, NUEVA ZELANDA, ALASKA, E ISLAS DEL PACIFICO.



Fuente: Estimates of Coastal Deepwater Wave Energy Potential for the World (1981).

En base a diversos estudios realizados en varias partes del mundo, se ha considerado que en una línea costera de entre 2 y 3 km. se podrían instalar por este medio entre 50 y 100 MW.

Más específicamente, una estructura de 100 m. de diámetro podría tener el potencial para producir de 2 a 6 MW, considerando para ello olas poco menores a 1 m., y no mayores de 4.5 m.\*\*\*

Los dispositivos para el aprovechamiento de la energía de las olas, se deberán colocar en costas con olas vigorosas (45-50 KW/m de promedio anual) que se encuentran predominantemente en las zonas correspondientes a los países desarrollados. Con algunas excepciones geográficas, como el sur de África y América.

\*\*\* WOODBRIDGE, D.D.  
Sources and Potential Uses of Wave Energy.  
Miami International Conference on Alternative Energy Sources.  
U.S.A. 1979.

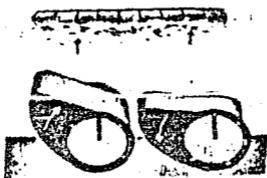
La energía de las olas se encuentra todavía en sus primeras etapas de experimentación, por lo que tal vez en base a mejoras en los diseños se puedan llegar a obtener cantidades importantes de energía, - en olas con menor potencia. ( en Japón existe un prototipo ubicado en aguas con olas de 14 KW/m ).

En la actualidad existen dos grupos básicos de dispositivos experimentales para la explotación de esta energía, que son:

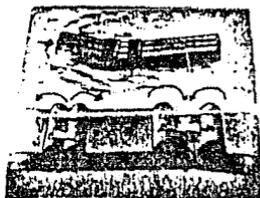
- a) Dispositivos que aprovechan la energía potencial debida a los cambios de nivel de la superficie del agua, para comprimir aire o elevar - agua que puede operar después en una turbina.
- b) Dispositivos que aprovechan la energía cinética de las olas para - mover flotadores que actúan sobre el émbolo de un cilindro de algún tipo de motor.

La energía de las olas presenta varios atractivos, como lo es el hecho de poder proveer energía de tormentas y vientos que ocurran a miles de kilómetros de distancia. En la actualidad algunos países - como la Gran Bretaña, realizan una construcción modular de dispositivos de cerca de 1 MW., con el sistema, llamado pato salado (salter duck) que tiene una eficiencia de aprovechamiento de la energía de las olas de aproximadamente un 90%. En la figura I.33 se muestran algunos de - los principales dispositivos existentes para el aprovechamiento de - la energía de las olas.

FIGURA I.33) PRINCIPALES DISPOSITIVOS DE APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS.



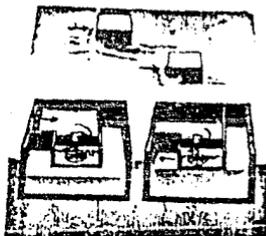
a) Pato Salado



b) Balsa de Vaivén



c) Columna de Agua Oscilante



d) Rectificador de Olas Russell.

Fuente: Cosmos, Gran Atlas Salvat. Tomo IV., (1984).

Por lo que toca a sus efectos ambientales, los dispositivos utilizados, presentan el problema de ser antiestéticos, además de que pueden llegar a tapar la visibilidad, problemas ambos que se pueden resolver de manera relativamente fácil, ya que estos dispositivos se pueden colocar a suficiente distancia de la costa donde no se verían ni estorbarían la visibilidad. Además podrían acarrear otros beneficios indirectos como el proveer a las costas de protección, en una especie de arrecifes artificiales.

Otras de sus desventajas son el que las reparaciones podrían resultar muy complicadas debido a las condiciones adversas del mar, ya que precisamente es en zonas con olas muy fuertes donde resultan más atractivos este tipo de dispositivos, también podrían causar problemas el crecimiento e incrustaciones de especies marinas en los mismos.

Finalmente el estudio de las Naciones Unidas sobre energía Oceánica, concluyó que la energía de las olas puede ser una opción viable para diversificar las fuentes de energía, cuando se hayan desarrollado más los dispositivos actualmente en experimentación, ya que por el momento su utilización resulta demasiado cara. Esto no se aplica, sin embargo, a otros usos potenciales en pequeña escala de la energía de las olas, como boyas luminosas, faros, iluminación de plataformas marinas, etc.

Vientos Oceánicos: Estos vientos son más fuertes que los terrestres, se calcula que a 20 o 30 Km mar adentro su fuerza sea de un 10 a un -- 14% mayor. Se estima que a futuro podrán aprovecharse con largos --- arreglos en las costas, con unidades de 5 a 10 MW, y vientos de 10 m/s denominados como OWEC (Offshore Wind Energy Clusters), y que son acepta**bles** desde el punto de vista ambiental. Quienes han estudiado más es**ta** fuente de energía son Gran Bretaña, Holanda y EUROCEAN (Organiza--- ción Europea para el estudio de los océanos). Para mayor información sobre los vientos oceánicos, consultar la parte correspondiente a ener**gía** eólica.

Corrientes Oceánicas: En la actualidad la producción de electricidad con estas corrientes es muy pequeña, y a un precio muy alto, por lo -- que no se prevé ninguna probabilidad de desarrollo comercial de esta -- fuente hasta antes del año 2,000. Existen 2 sistemas básicos para su aprovechamiento que son: una turbina de flujo axial, y los sistemas denominados como paracaídas ancla. Los países más adelantados en es**ta** área son Japón y los Estados Unidos.

Gradientes Salinos: Estudios científicos en laboratorio han demost**ra**do la posibilidad de obtener potencia de los gradientes salinos.

Su potencialidad parece ser muy oscura por el momento, debi**do** más que nada al poco calor que se produce al diluir el agua de mar - en agua fresca (0.5° C), y a que su conversión en potencia es relativa**mente** compleja. Hasta el momento se han sugerido tres sistemas distin**tos** para su aprovechamiento; ósmosis por presión retardada, electrodiálisis reversiva, y compresión inversa de vapor. Los dos primeros nece**sitan** de membranas como elementos de trabajo, además de que el segundo sistema requiere electrodos adicionales.

El tercer sistema no requiere de membranas pero si de inter**---** cambiadores de calor. A pesar de los estudios y esfuerzos en el ----

desarrollo de membranas, estas continúan siendo muy caras e ineficientes, por lo que solo E.U.A. y Suecia realizan algunos esfuerzos en su desarrollo. Sin embargo, no se espera ninguna transición a aplicaciones prácticas de este recurso, antes del año 2000.

Biomasa Marina: La biomasa marina tiene promedios de crecimiento extremadamente altos comparada con la terrestre. Además, el aprovechamiento de la energía de la OTEC, proporciona una gran cantidad de agua rica en nutrientes, susceptible de aprovecharse.

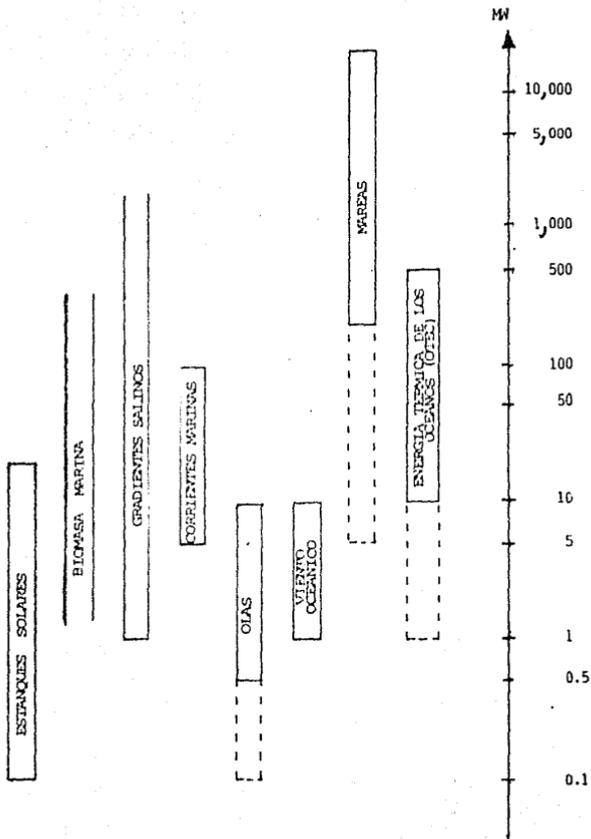
Resulta particularmente interesante el aprovechamiento combinado de la biomasa marina con otras fuentes oceánicas de energía, (OTEC con maricultura; energía de las olas y cultivos de algas marinas, etc.) Para mayor información a este respecto, consultar la parte correspondiente a biomasa no convencional.

Estanques Solares: Para mayor información de este recurso consultar la parte correspondiente a energía solar.

Geotermia Marina: Para mayor información de este recurso consultar el capítulo III.5 correspondiente a otros sistemas geotérmicos.

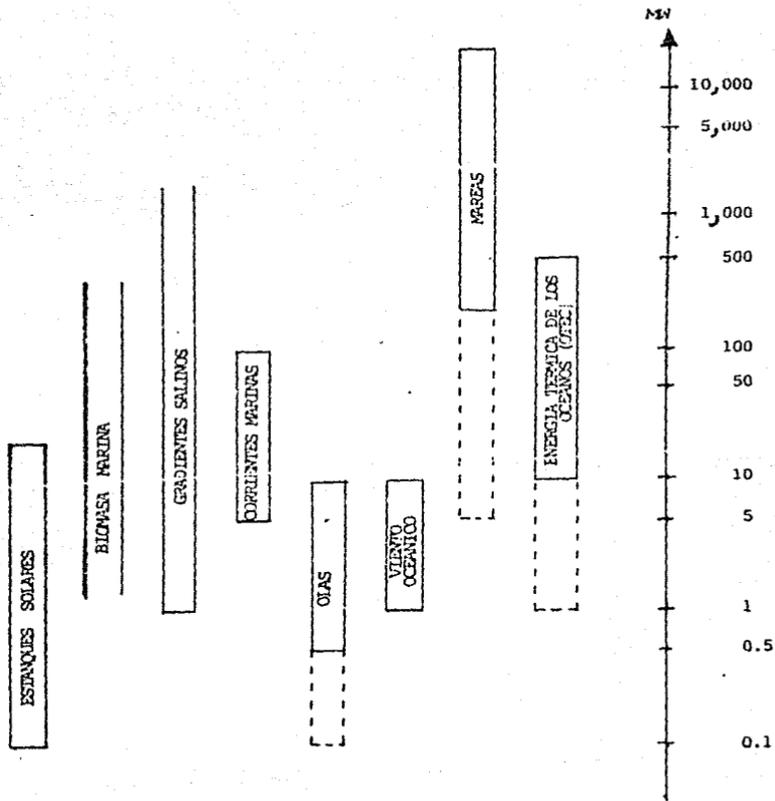
En la figura I.34 se muestran los rangos de producción en MW. susceptibles de producirse con los diversos tipos de energía oceánica.

FIGURA 1.34) PRODUCCION EN MW CON DIVERSOS TIPOS DE ENERGIA OCEANICA



Fuente: Report of the Technical Panel on Ocean Energy. O.N.U. (1981)

FIGURA I. 34) PRODUCCION EN MW CON DIVERSOS TIPOS DE ENERGIA OCEANICA



Fuente: Report of the Technical Panel on Ocean Energy. O.N.U. (1981)

1) Recursos Nucleares Fusibles.

A estos recursos se les denomina también como combustibles nucleares fusibles, pero al igual que en la fisión nuclear, conviene hacer la aclaración de que en el proceso de fusión nuclear, no se realiza un proceso de combustión, en el sentido estricto de la palabra (consultar el capítulo I.2), sino de fusión o unión de 2 o más núcleos de átomos ligeros en un solo núcleo de masa más elevada, lo cual va acompañado de la liberación de grandes cantidades de energía.

De hecho, cuando dos núcleos ligeros se unen para formar otro de masa más elevada, se observa que la masa de este último es inferior a la suma de aquellos. El defecto de masa, o sea la parte de materia que ha desaparecido, se ha convertido en energía con arreglo a la fórmula de Einstein ( $E = mc^2$ ), donde  $c$  es la velocidad de la luz, fórmula que muestra la equivalencia entre la masa y la energía.

La fusión nuclear es la fuente de energía más poderosa que conoce la humanidad hasta el momento.

Existen potencialmente varias reacciones para lograr la fusión nuclear, la que más energía produce es la que utiliza el helio, de hecho de ella proviene la energía del sol y las estrellas, aunque al parecer hasta el momento, la reacción más prometedora es la que utiliza el deuterio y el tritio, ambos isótopos del hidrógeno, debido a que requiere las condiciones más accesibles de temperatura (arriba de los 50 millones de grados centígrados) y duración del confinamiento.

Dado que el hidrógeno, y sus isótopos deuterio y tritio, constituyen la mayor parte del agua, los océanos son prodigiosos e inagotables manantiales de energía latente.

Los recursos de deuterio que se pueden obtener a partir - del agua son prácticamente infinitos, y los procesos necesarios para ello están prácticamente perfeccionados, resultando relativamente caros, si se toma en cuenta la cantidad de energía que puede obtenerse de ellos. La fusión del deuterio contenido en un litro - de agua (esto es, 17.8 mJ del mismo) es capaz de proporcionar la - misma energía que 80 litros de gasolina de alto octanaje.\*\*

Por lo que respecta al tritio, que es un gas radiactivo - artificial, puede obtenerse a partir del litio por absorción de -- neutrones rápidos. A su vez el litio es un metal relativamente raro, y según las actuales estimaciones los recursos recuperables de litio son del orden de 1 millón de toneladas, sin incluir el litio disuelto en el mar. A largo plazo, la recuperación del litio del agua de mar podría suministrar todos los recursos necesarios.

La importancia energética del litio (llamado por algunos - elemento-energía) puede apreciarse más claramente en las estimaciones que indican que 300 toneladas de litio natural pueden producir un millón de GWh de electricidad, cantidad similar a la producida - por el Mercado Común Europeo en 1980.\*\*\*

\*\* LARTIGUE, G. Juan; Sobarón, M. Jesús.  
El Litio: Nuevo Material Estratégico.  
Revista Ciencia y Desarrollo.  
núm. 71, año XII, noviembre-diciembre de 1986.

\*\*\* Idem al anterior.

La energía que se puede obtener de la fusión del hidrógeno pesado en una reacción de fusión nuclear es, en números cerrados, de 100,000 kWh por gramo de hidrógeno pesado, lo cual corresponde a cerca de 4 veces la energía por gramo susceptible de aprovecharse de la fisión del uranio.\*\*

Se estima que el costo de los combustibles para los sistemas de fusión nuclear, son de menos del 1% de los costos actuales del carbón.\*\*

De ahí que si se logra controlar la fusión nuclear, constituirá una fuente inagotable de energía. Se estima que (suponiendo un consumo de energía de algunos cientos de veces la demanda actual en el mundo) la energía que se puede obtener de los océanos a partir de la fusión nuclear es mayor que la vida esperada del sol, la cual estima en varios billones de años.\*\*\*\*

El proceso para la fusión nuclear se descubrió a mediados de los años 30, pero es a partir de los 50 que se inició un gran programa en todo el mundo a fin de lograr su desarrollo.

Sin embargo hasta el momento no se ha podido lograr una reacción sostenida y controlada de fusión, como la lograda por Fermi en 1940, al demostrar experimentalmente la factibilidad de las reacciones controladas de fisión.

\*\* POST, F. Richard.  
Implications of the Fusion Power Source to the Electricity Utility Industry. The Fusion Process, part II.  
DOE-EPRI. October, 1977.

\*\*\* Idem al anterior.

\*\*\*\* Idem al anterior.

Obtener la fusión de los núcleos no es nada fácil, ya que estos son eléctricamente positivos, y como dos cuerpos con la misma carga se repelen, se requiere de una energía muy grande para — que, venciendo la repulsión, los núcleos puedan entrar en contacto.

Esto puede lograrse bombardeando los núcleos con partículas aceleradas, de mayor energía que la de repulsión.

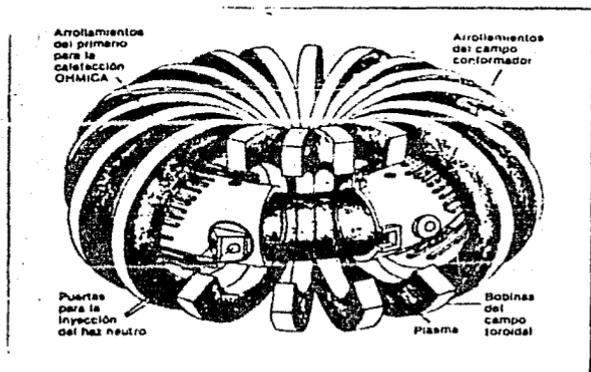
En las estrellas dicha energía resulta de la agitación — térmica provocada por las temperaturas elevadísimas a que se halla sometida la materia entre ellas.

Como la energía de fusión solamente se puede obtener a — temperaturas de millones de grados centígrados,\*\* y dado que no exis-  
ta ninguna materia que pueda soportar tales temperaturas, las in-  
vestigaciones actuales tratan de demostrar experimentalmente la —  
realización de la fusión nuclear controlada, siguiendo dos procedi-  
mientos diferentes.

El primero de ellos consiste en el desarrollo de plasmas-  
(concentraciones de partículas muy agitadas), con densidades de —  
10,000 a 100,000 veces la del aire, calentados hasta la temperatu-  
ra de fusión, y contenidos por períodos de tiempo de alrededor de —  
un segundo, por medio de campos magnéticos, en el centro de reci-  
pientes ("botella magnética") de manera que no puedan alcanzar las  
paredes de los mismos y fundirlos. En base a esto se han desarro-  
llado diversos sistemas, de los cuales el más prometedor el dispo-  
sitivo ruso denominado TOKAMAK. En la figura I.35 se muestra el  
diagrama de un reactor de fusión de este tipo.

\*\* Debido a la ineficiencia de los actuales sistemas de fusión —  
nuclear, las temperaturas necesarias para lograr la fusión —  
son del orden de  $100 \times 10^6$  °C o más.

FIGURA I. 35) DIAGRAMA DE UN REACTOR DE FUSION TOKAMAK.



Fuente: El Litio: Nuevo Material Estratégico. (1986).

El segundo procedimiento trata de iniciar la fusión nuclear mediante un laser de alta energía, usando para ello confinamientos inerciales, pero presenta la desventaja de requerir de densidades muy grandes de combustibles.

En cualquiera de las dos variedades las plantas de fusión consistirán en un reactor para fusionar el deuterio y el tritio, - que estará rodeado por un manto de litio, cuyo función será la de producir más tritio, pudiendo producir más que el que consume.

Cálculos efectuados han demostrado que un manto de 130 Kg de litio, por cada megawatt térmico instalado, permitirá producir el tritio necesario para la operación del reactor, con un tiempo - de duplicación de 17 meses.\*\*

La gran ventaja de los sistemas de fusión nuclear sobre los de fisión, además de su potencialidad, consiste en que la radiación que emiten es muy pequeña si se le compara con la cantidad de energía que liberan. Esto es, la fusión nuclear prácticamente no es contaminante.\*\*\*

\*\* Tiempo necesario para producir el excedente de tritio suficiente para construir otro reactor.

\*\*\* POST, F. Richard.  
Implications of the Fusion Power Source to the Electricity Utility Industry. The Fusion Process, part II.  
DOE-EPRI. October, 1977.

Actualmente en todo el mundo se están diseñando y construyendo reactores de fusión con una potencia total de cerca de 100 GW.\*\*

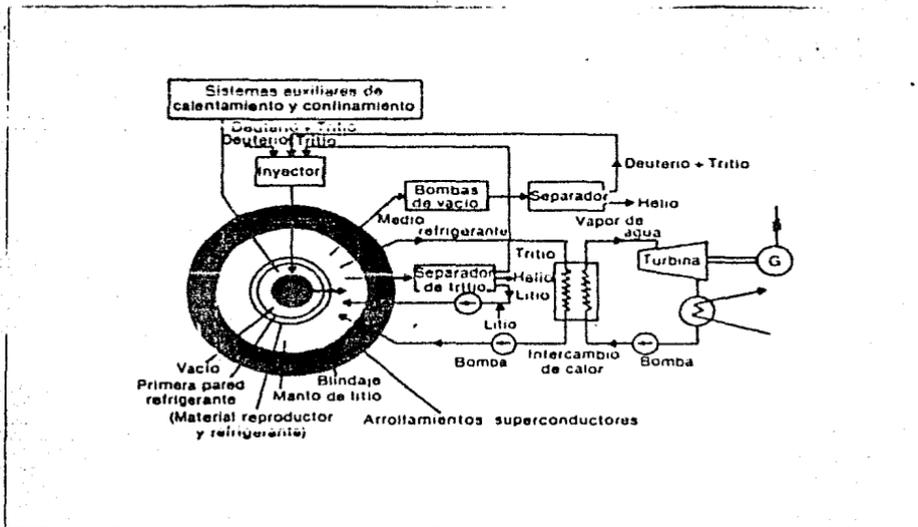
Aunque se calcula que para la década de los 90 o principios del siglo XXI se podrá controlar la fusión por medio del sistema de confinamientos magnéticos,\*\* los pronósticos señalan que -- tal vez pueda tenerse en operación una instalación de demostración de la fusión nuclear, a escala industrial, en la primera cuarta -- parte del próximo siglo.

En la figura I. 36 se muestra el esquema de una planta nuclear eléctrica de fusión.

\*\* LARTIGUE, G. Juan; Soberón, M. Jesús.  
El Litio: Nuevo Material Estratégico.  
Revista Ciencia y Desarrollo.  
num. 71, año XII, noviembre-diciembre de 1986.

\*\*\* Idem al anterior.

FIGURA I.36) PLANTA NUCLEOELECTRICA DE FUSION.



Fuente: El Litio: Nuevo Material Estratégico. (1986).

Resumiendo se tiene que hasta el momento ningún sistema renovable, excepto la energía hidráulica \*\*, ofrece una fuente segura de energía que responda a las grandes necesidades de las sociedades urbanas modernas. De hecho, todos estos sistemas presentan ciertas características en común, que son las siguientes:

- Su desarrollo tecnológico ha sido lento.
- Su densidad energética es relativamente baja.\*\*\*
- Su suministro no es continuo, ya que varía en el tiempo y no es posible mantenerlo exacto como en el caso de las termoeléctricas, carboceléctricas o nucleoceléctricas, por lo que necesitarán del respaldo de otras fuentes (las tradicionales) para poder asegurar la continuidad del sistema.

\*\* Aunque la energía geotérmica y biomasa convencionales son fuentes renovables y seguras de energía, sus posibilidades, por lo menos hasta el momento, no son lo suficientemente amplias como para poder satisfacer las grandes necesidades humanas de energía.

\*\*\* Se excluye la fusión nuclear, ya que su densidad energética es la más alta de todas las fuentes de energía conocidas hasta el momento, pero sin embargo, su utilización no es todavía una realidad.

APENDICE ( A ) : BREVE DESCRIPCION DE LAS TECNOLOGIAS UTILIZADAS EN LA PRODUCCION DE ELECTRICIDAD, A TRAVES DE DIFERENTES FUENTES DE ENERGIA.

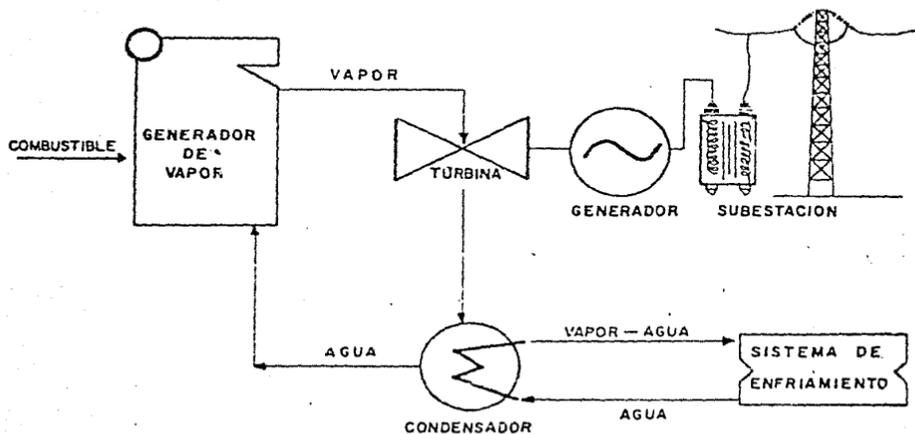
A.1) CENTRALES TERMOELECTRICAS CONVENCIONALES.

Este tipo de central puede utilizar como fuente primaria-- (combustible), combustóleo o gas natural. Los países son los que-- deciden la utilización de uno u otro combustible, en base a su mayor o menor disponibilidad. Para el caso de México, se utiliza básicamente combustóleo, por ser el combustible predominante.

En la figura A.1 se puede observar que una vez que el combustible entra, el generador de vapor transforma el poder calorífico del mismo en energía térmica, la cual es aprovechada para llevar el agua a la fase de vapor. Es este vapor ya sobrecalentado, el que-- se conduce a la turbina, donde se transforma su energía cinética en energía mecánica, la cual se transmite al generador para producir energía eléctrica, que es finalmente aprovechada por el consumidor.

El autoconsumo de electricidad de los equipos auxiliares-- se estima en un 6.3% de la generación bruta. Siendo este porcentaje poco sensible a las variaciones de capacidad, por lo que se le puede considerar constante para todos los tamaños de planta.

FIGURA A.1) CENTRAL TERMOELECTRICA CONVENCIONAL



Fuente: Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico. (1984).

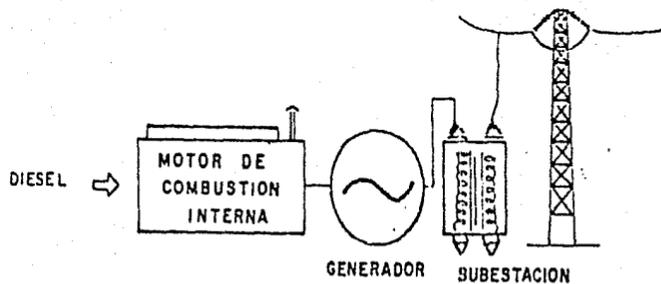
**A.2) UNIDADES DIESEL.**

Estas unidades siguen el principio de los motores de combustión interna, aprovechando la expansión de los gases de combustión para obtener energía mecánica, la cual se transforma en energía eléctrica en un generador. En la figura A.2 se muestra esquemáticamente este proceso.

En realidad este tipo de unidades consumen una mezcla de diesel y combustóleo, variando la proporción de dicha mezcla desde 1 a 9 hasta 3 a 7 partes, lo cual depende básicamente de la calidad del combustóleo disponible, de ahí que los fabricantes producen los equipos bajo pedido y en base a la mezcla que se pretenda utilizar.

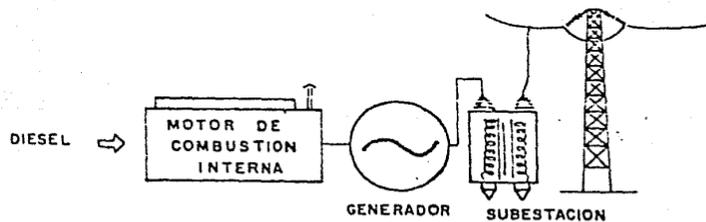
Su consumo de energía para usos propios se estima en 5.2% de la energía bruta.

FIGURA A.2) UNIDAD DIESEL.



Fuente: Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico. (1984).

FIGURA A.2) UNIDAD DIESEL



Fuente: Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico. (1984).

A.3) UNIDADES TURBOGAS.

En estas unidades se puede utilizar tanto gas natural como diesel, dependiendo de las disponibilidades y demandas de los mismos. El cambio en la utilización de gas a diesel, tiene dos efectos sobre la unidad; primero la potencia sufre una reducción estimada en 2.75% y en segunda la eficiencia se reduce aproximadamente en 5.70%.

Estas unidades tienen un tiempo de arranque muy corto, lo cual las hace ventajosas para satisfacer cargas pico, ya que como puede observarse en la figura II.6, para factores de planta de 0.1- y hasta 0.2, son las más económicas.

Su consumo de energía para la operación de los equipos auxiliares es del orden del 0.9% de su generación bruta.

Su funcionamiento consiste en el aprovechamiento en los álabes de la turbina, de la energía mecánica resultante de la expansión del aire proveniente de un compresor, y de los gases de la combustión, que salen comprimidos y a altas temperaturas. Esta energía acoplada al rotor del generador es la que hace que se produzca la energía eléctrica. Es importante hacer notar que el aire caliente después de trabajar en la turbina es descargado a la atmósfera. En la figura A.3 puede apreciarse gráficamente este funcionamiento.

A.3) UNIDADES TURBOGAS.

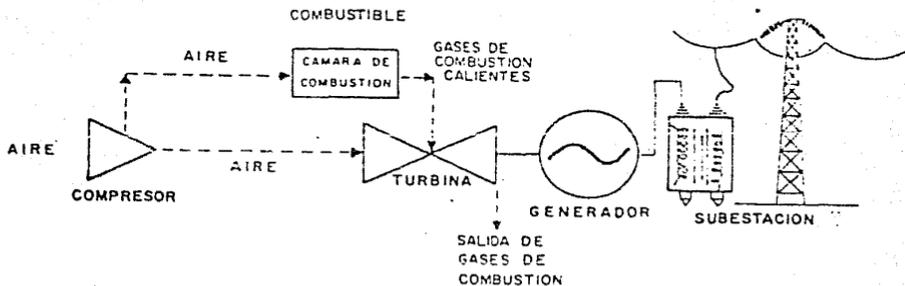
En estas unidades se puede utilizar tanto gas natural como diesel, dependiendo de las disponibilidades y demandas de los mismos. El cambio en la utilización de gas a diesel, tiene dos efectos sobre la unidad; primero la potencia sufre una reducción estimada en 2.75% y en segunda la eficiencia se reduce aproximadamente en 5.70%.

Estas unidades tienen un tiempo de arranque muy corto, lo cual las hace ventajosas para satisfacer cargas pico, ya que como puede observarse en la figura II.6, para factores de planta de 0.1- y hasta 0.2, son las más económicas.

Su consumo de energía para la operación de los equipos auxiliares es del orden del 0.9% de su generación bruta.

Su funcionamiento consiste en el aprovechamiento en los álabes de la turbina, de la energía mecánica resultante de la expansión del aire proveniente de un compresor, y de los gases de la combustión, que salen comprimidos y a altas temperaturas. Esta energía acoplada al rotor del generador es la que hace que se produzca la energía eléctrica. Es importante hacer notar que el aire caliente después de trabajar en la turbina es descargado a la atmósfera. En la figura A.3 puede apreciarse gráficamente este funcionamiento.

FIGURA A.3) UNIDAD TURBOGAS



Fuente: Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico. (1984).

#### A.4 CENTRALES DE CICLO COMBINADO.

Este tipo de central está integrada por dos tipos diferentes de unidades generadoras, las turbinas y las de vapor.

Una vez terminado el ciclo de generación en las unidades turbinas, los gases que en dichas unidades convencionales se desechan, ahora se aprovechan debido a su alto contenido energético, manifestado en sus altas temperaturas. En estas centrales se utiliza dicha energía para calentar el agua llevándola a la fase de vapor, la cual es aprovechada para generar energía eléctrica, siguiendo el mismo proceso descrito en las plantas termoeléctricas convencionales.

De hecho se utilizan dos generadores sincronizados, que son los que producen la energía eléctrica que se distribuye, por otra parte, presentan la desventaja de tener un costo de instalación más alto, debido a la mayor necesidad de equipo, y a la duplicación de generadores básicamente. Esto puede verse esquemáticamente en la figura A.4.

El arreglo general de este tipo de planta es difícil de esquematizar, debido a la diversidad de posibilidades. Pudiendo variar el número de unidades turbinas por unidad de vapor, desde uno a uno, hasta cuatro a uno y aún más.

Por lo que toca a la fase de vapor existen tres variantes en el criterio de diseño:

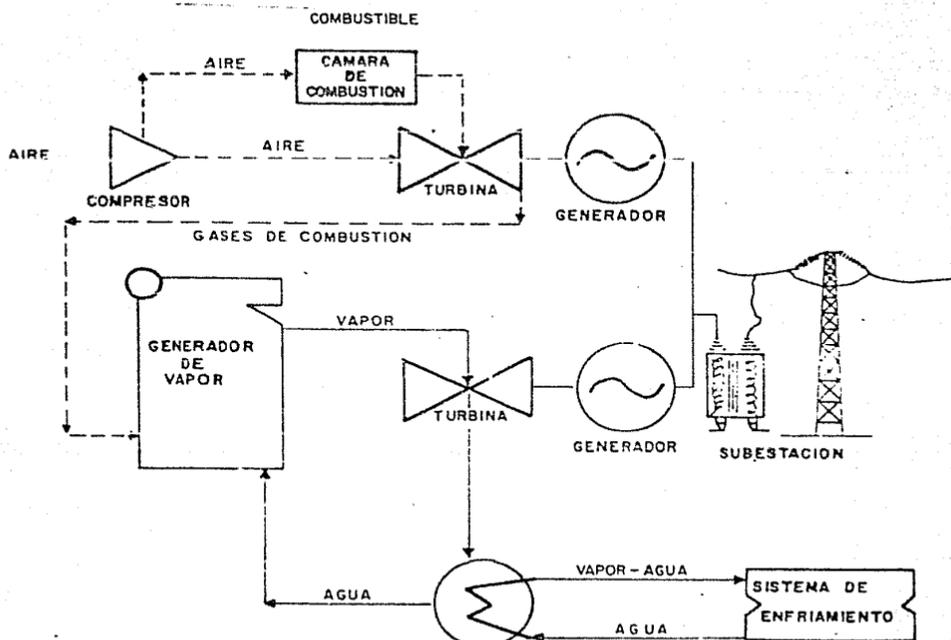
- a) Sin quemado adicional de combustible.
- b) Con quemado adicional de combustible para control de la temperatura de rocío.
- c) Con quemado adicional de combustible para aumentar -- temperatura y presión de vapor.

Una de las grandes ventajas de este tipo de planta, es la posibilidad de poder erigirlas en dos etapas. La primera, o sea la unidad turbogas, se puede terminar en un plazo bastante breve y ponerse a funcionar, para posteriormente construir la segunda etapa, - la de vapor, con lo que se complementa el ciclo combinado.

Las unidades turbogas que operan en ciclo abierto, al integrarse al ciclo combinado sufren una reducción de potencia, que se estima en un 25%. Estas unidades pueden operar con gas o diesel, y de manera análoga a lo expuesto para las unidades turbogas el cambio de gas a diesel supone reducciones en la potencia y la eficiencia es timadas en 1.85 y 3.83% respectivamente.

El consumo para usos propios de este tipo de central es -- del orden del 3%

FIGURA A.4) CENTRAL CICLO COMBINADO



Fuente: Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico. (1984).

A.5) CENTRALES CARBOELÉCTRICAS.

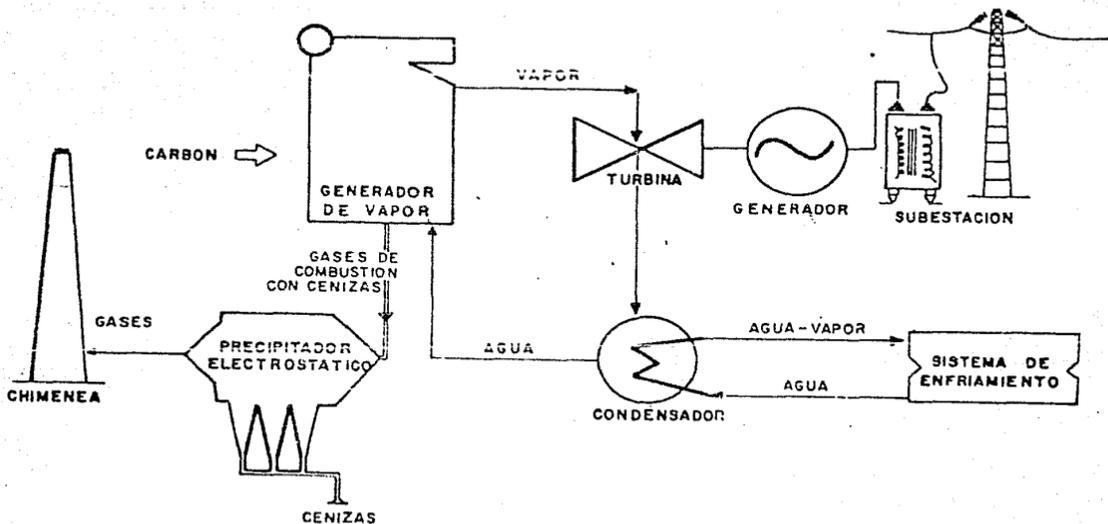
En cuanto a su concepción básica, no difieren de las centrales termoeléctricas convencionales, de hecho la única diferencia importante estriba en la utilización del carbón como energético primario. Otra parte importante también en el diseño de este tipo de central es el precipitador de cenizas que generalmente es del tipo electrostático, ya que los gases que salen de la combustión contienen una gran cantidad de cenizas, las cuales deben de recuperarse para no contaminar el medio ambiente, máxima que la cantidad que sale de las mismas es bastante grande. Cuando el carbón que se utiliza tiene contenidos altos de azufre, se hacen necesarios también equipos desulfurizadores, aunque en el caso de México esto no ha sido necesario, por ser el carbón mexicano de bajo contenido de azufre.

En la figura A.5 se ve esquemáticamente el funcionamiento de una planta carboeléctrica.

Uno de los principales problemas con este tipo de central radica en que en la práctica, el carbón y sus residuos de la combustión necesitan de un manejo mucho más complejo que los combustibles líquidos o gaseosos.

El consumo propio de auxiliares para una unidad de 350 MW. se estima en un 8.5% de la energía bruta.

FIGURA A.5) CENTRAL CARBOELECTRICA



Fuente: Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico. (1984).

A.6) CENTRALES NUCLEOELÉCTRICAS.

Este tipo de central tiene cierta semejanza con las plantas termoeléctricas convencionales, ya que también utiliza vapor a presión para mover los turbogeneradores. Sin embargo, a diferencia de las termoeléctricas y carboeléctricas, no utiliza combustibles fósiles para producir el vapor, sino que aprovecha el calor que se obtiene al fisionar átomos del isótopo  $U_{235}$  en el interior de inmensos reactores.

Todos los reactores nucleares tienen 3 elementos en común que son: El combustible (que en los reactores convencionales puede ser  $U_{235}$  o plutonio); el moderador, el cual es un material que reduce la energía de los neutrones de alta velocidad emitidos durante la fisión del  $U_{235}$ , incrementando así la eficiencia con que pueden inducir nuevas fisiones (es común el uso del grafito como moderador); y el refrigerante, siendo los más comunes el agua y el gas.

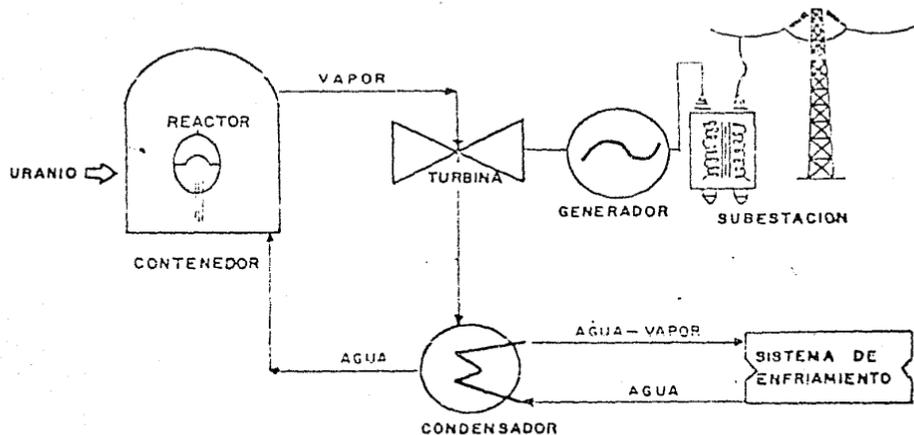
Existen muy diversos tipos de reactores en base a las combinaciones de estos tres elementos, siendo los más comunes:

- a) PWR (Reactor de agua ligera a presión).
- b) BWR (Reactor de agua ligera hirviente).
- c) PWR (Reactor de agua pesada a presión).
- d) GMR (Reactores moderados por grafito).
- e) FBR (Reactores rápidos de crfa).

El consumo de energía para usos propios de las centrales nucleoelectricas se estima en 4.5% de la energía bruta.

En la figura A.6 se muestra esquemáticamente el funcionamiento de una planta nucleoelectrica con reactor de agua ligera a presión (PWR).

FIGURA A.6) CENTRAL NUCLEOELECTRICA (LWR)



Fuente: Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el sector Eléctrico. (1984).

A.7) CENTRALES GEOTERMOLÉCTRICAS.

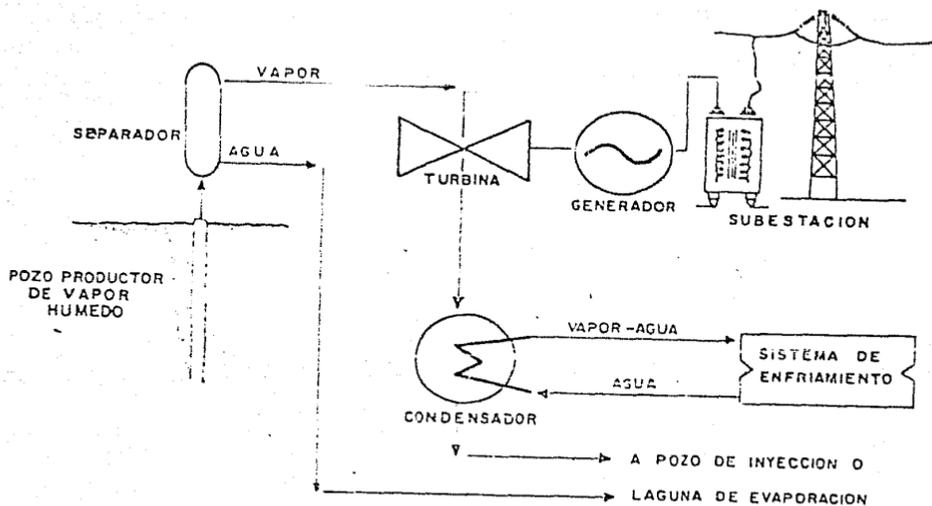
Su funcionamiento es similar al de las termoléctricas convencionales, a diferencia de que no llevan el generador de vapor ya que las funciones de este las cumple el mismo productor.

El vapor se obtiene de un separador que recibe una mezcla de agua-vapor (o de vapor en el caso de yacimientos sobrecalentados), extraída del subsuelo. Existe una variante en el caso de las unidades de pocos MW (generalmente menos de 15 MW), que consiste en -- instalarlas a boca de pozo.

Se estima que las unidades de mayor capacidad consumen -- para usos propios el 5.1% de la energía bruta, y las de poca capacidad (como las de 5 MW), el 0.2%, siendo este el consumo propio para auxiliares más bajo de todos, seguido por el de las plantas hidroeléctricas y el de las unidades turboxas.

En la figura A.7 se muestra el esquema básico de funcionamiento de una planta geotermoléctrica como las de 55 o 110 MW.

FIGURA A.7) CENTRAL GEOTERMOCLECTRICA



Fuente: Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico. (1984).

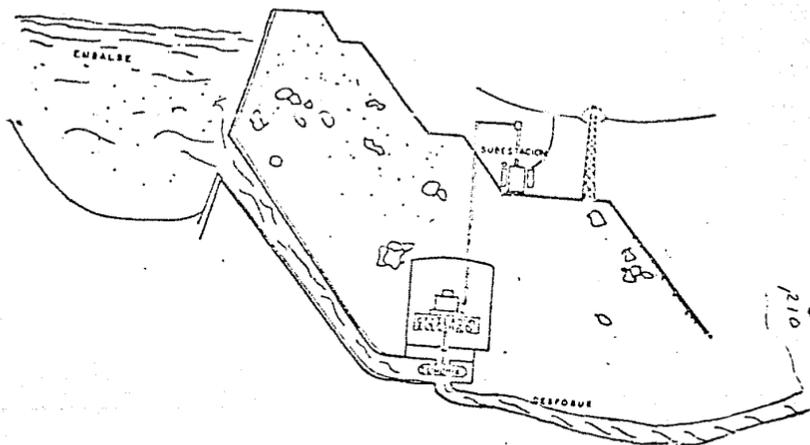
A.8) CENTRALES HIDROELECTRICAS.

En general el principio de un aprovechamiento hidroeléctrico consiste en convertir la energía potencial o de posición del agua, en energía cinética y luego en energía eléctrica, para esto se deja caer por gravedad una masa de agua a través de un conducto, para que la energía cinética de esta caída, haga mover los álabes de una turbina, la cual convertirá dicha energía cinética en energía mecánica, y simultáneamente esta se transforma en energía eléctrica en un generador. En la figura A.8 se muestra el bosquejo básico de funcionamiento de este tipo de central.

Las centrales hidroeléctricas presentan el inconveniente de no permitir estandarizaciones, ya que la heterogeneidad de los proyectos provoca que exista una gran variedad de diseños, métodos constructivos y tamaños. Por lo que se hace inoperante la determinación de costos unitarios de referencia.

El consumo propio para auxiliares, se estima en el 0.5% de la energía bruta generada.

FIGURA A.8) CENTRAL HIDROELECTRICA.



Fuente: Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico. (1984).

REFERENCIAS

( LA ENERGIA )

- 1.- Actividades de la CFE en Materia de Generación Nucleoeléctrica.  
Boletín I.I.E., págs. 217-225.  
Noviembre/diciembre de 1985.
- 2.- ALONSO, Concheiro Antonio; RODRIGUEZ, Viqueira Luis.  
Diagnóstico y Pronóstico sobre Energía Solar, Biomasa y Energía Eólica.  
Tomos I y II., Elaborados para el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, proyecto 2106, Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.  
México, noviembre de 1982.
- 3.- ALONSO, Espinosa Héctor.  
Geotermia, Una Fuente Alternativa de Energía para la Producción de Electricidad.  
Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, C.F.E.  
México, agosto de 1984.
- 4.- Alonso, Espinosa Héctor.  
La Energía Geotérmica en México.  
Tesis de licenciatura.  
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.  
México, 1960.
- 5.- ALPERN, Boris.  
Les Schistes Bitumineux: Constitution, Réserves, Valorisation.  
Bull. Centres Rech. Explor.- Prod. Elf - Aquitaine.  
Pau, novembre 30, 1981

- 6.- Alternative Energy Sources.  
3rd. Miami International Conference on Alternative Energy Sources.  
University of Miami, Clean Energy Research Institute, Coral Gables,  
Fla, U.S.A., 1980.
- 7.- ASE; Alternative Sources of Energy.  
The Magazine of the Independent Power Production Industry.  
Num. 79. March, 1986.
- 8.- BACCOI, PAULICE, FERRIS, RICHARD.  
Wave Power Prototype Nears Construction Phase.  
Vol. 89, n. 2, United Kingdom  
February 1985.
- 9.- Balance Nacional de Energía ( 1982-1984 )  
Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (SEMIP)  
México, julio de 1986.
- 10.- BAUM, Vladimir.  
Will Nuclear Doubts Affect Growth ?  
World Electricity.  
Petroleum Economist.  
August 1986.
- 11.- BEYDORF, A.F.; STUERZINGER, P.S.  
La Utilización más Eficiente de la Energía, El Recurso Invisible.  
Conferencia Mundial de Energía.  
Munich, 1980
- 12.- Boletines "Energéticos" de agosto de 1979 y febrero de 1982.  
Comisión Nacional de Energéticos.  
México.

- 13.- BORJA, Díaz Raúl E.  
Compendio de Fabricantes de Aerogeneradores Comerciales y Características de las Máquinas.  
Instituto de Investigaciones Eléctricas.  
División Fuentes de Energía, Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía.  
México, enero de 1986.
- 14.- BORJA, Díaz Raúl E.  
Consideraciones sobre Interconexión de Aerogeneradores a Circuitos de Distribución.  
Informe IIE/10/14/3467/121/P/VI.  
Instituto de Investigaciones Eléctricas.  
División Fuentes de Energía, Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía  
Sin fecha.
- 15.- BORJA, Díaz Raúl E.  
Grandes Sistemas Experimentales para la Conversión de Energía -- Eólica en los Estados Unidos.  
Informe IIE/10/14/3467/124/P/VI  
Instituto de Investigaciones Eléctricas.  
División Fuentes de Energía, Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía.  
México, noviembre de 1985.
- 16.- BORJA, Díaz Raúl E.  
Información Estadística sobre Centrales Eoloeléctricas.  
Informe IIE/10/14/3467/122/P/VI  
Instituto de Investigaciones Eléctricas.  
División Fuentes de Energía, Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía.  
México, septiembre de 1985.

- 17.- BORJA, Díaz Raúl E.  
Programas de Investigación y Desarrollo sobre Sistemas Conver-  
sores de Energía Eólica en Canadá y Europa.  
Informe IIE/10/14/3467/123/P/VI  
Instituto de Investigaciones Eléctricas.  
División Fuentes de Energía, Departamento de Fuentes No Conven-  
cionales de Energía.  
México, noviembre de 1985.
- 18.- CALDERA, M.E.; SALDANA, F.R.  
Evolución Preliminar del Potencial de Generación Eléctrica en la  
Zona de la Ventosa, Oaxaca.  
Instituto de Investigaciones Eléctricas.  
División Fuentes de Energía, Departamento de Fuentes No Conven-  
cionales de Energía.  
Proyecto con apoyo financiero del CONACYT.  
México, abril de 1986
- 19.- Ciencia de la Tierra II - Energía.  
Enciclopedia de las Ciencias.  
Editorial Grollier. Tomo III. 6a. Edición.  
México, 1983.
- 20.- COFFAY, B.  
Economics of OTEC.  
Energy Technology Conference, 8, 1981. Washington, D.C. New Fuels  
Era, proceedings, Rockville, MD. Government Institutes.  
U.S.A., June 1981.
- 21.- Cosmos. Gran Atlas Salvat  
Los Recursos Naturales, Tomo IV  
Editorial Salvat.  
España, 1985

- 22.- Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico.  
Tomo I: Generación. Gerencia de Estudios, Subdirección de Construcción, Comisión Federal de Electricidad  
México, 1984.
- 23.- CUIP, W. Archie.  
Principles of Energy Conversion.  
International student edition.  
Mc. Graw - Hill Kogakusha, LTD.  
U.S.A., 1979
- 24.- CHARLIER, Roger H.  
Developments in Tidal Power.  
Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 17, 1982.  
Los Angeles, CA., Energy the spark and lifeline of Civilization, proceedings., Piscataway, NY: IIE.  
U.S.A., 1982
- 25.- CHARLIER, Roger H.  
Small Ocean Powered Schemes.  
The Future of Energy Resources Conference.  
Unitar, Los Angeles California, 1983.
- 26.- DE ANDA, Flores Luis F.  
Evolución del Sector Eléctrico.  
Symposium sobre la Historia de la Ingeniería en México. U.N.A.M.  
México, noviembre de 1983
- 27.- DE ANDA, Flores Luis F.  
Panorama Eléctrico de México.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, 1958

- 28.- DE GALLANA, M. Tomás.  
Pequeño Larousse Técnico.  
Ed. Larousse.  
México, 1976
- 29.- Demande d' Energie.  
Perspectives énergétiques mondiales a l'horizon 2020.  
Conférence Mondiale de l'Energie.  
Edition Techniques et Economiques.  
Paris, 1979.
- 30.- DICKSON, David.  
Tecnología Alternativa.  
Colección Muy Interesante, Biblioteca de divulgación científica.  
Ediciones Orbis, segunda edición.  
España, 1985.
- 31.- Electricity. Sources and technologies.  
Decision makers 1300 bookshelf.  
Edison Electric Institute.  
U.S.A., 1982.
- 32.- Encuesta sobre los Recursos Energéticos 1980.  
Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Hanover.  
XI Conferencia Mundial de Energía.  
Munich, República Federal Alemana, septiembre de 1980.
- 33.- Energéticos: Boletín informativo del sector energético.  
Año 6, mayo 1982.
- 34.- Energy.  
Power Magazine, 75th. anniversary,  
September 1957.

- 35.- ESCOFET, Artigas Alberto; RODRIGUEZ, Soto Enrique; CASTILLO, - Nieto Fernando.  
El Uranio en México.  
Programa Universitario de Energía.  
Julio de 1984.
- 36.- Estado Actual de la Evaluación del Potencial Hidroeléctrico Nacional.  
Gerencia General de Estudios e Ingeniería Preliminar. Comisión Federal de Electricidad.  
México, 1978.
- 37.- Estudios Carboníferos en C.F.E.  
Subjefatura de Estudios Geológicos, Departamento de Estudios - Carboníferos y Nucleares.  
México, D.F., octubre de 1985.
- 38.- FERNANDEZ, Zayas José Luis.  
Apuntes de la Materia Conversión Termodinámica de la Energía - Solar.  
Maestría en Ingeniería Energética, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.  
México, noviembre de 1982.
- 39.- FERNANDEZ, Zayas José Luis; ESTRADA-CAJIGAL, Vicente.  
Cálculo de la Radiación Solar Instantánea en la República Mexicana. N° 472, Series del Instituto de Ingeniería., U.N.A.M.  
México, octubre de 1983.
- 40.- FERNANDEZ, Zayas José Luis.  
Introducción al Estudio de los Sistemas Solares Activos.  
Proyecto 2139, Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.  
México, noviembre de 1982.

- 41.- Final Report of the technical Panel on Oil Shale and Tar Sands. Preparatory Committee for the United Nations Conference on New and Renewable Sources of Energy. A/Conf.100/PC/25, January 14, 1981, General Assembly, United Nations.
- 42.- Framatome Newsletter.  
U.S.A. N° 24, september 1986.
- 43.- GONZALEZ, Villarreal Javier.  
Estado Actual de la Evaluación del Potencial Hidroeléctrico Nacional  
Ingenieria: Organo Oficial de la Facultad de Ingenieria de la --  
U.N.A.M., vol. I, Nun. 3  
México, 1980.
- 44.- GORDON, J.L.  
Hydropower Cost Estimates.  
Water Power & Dam Construction,  
November 1983.
- 45.- GRONICH, Sigmund.  
Session on Ocean Thermal Energy-Progress and Plans OTEC Program  
Status and Plans.  
Energy Technology Conference, 5.  
Washington U.S.A. 1978.
- 46.- Implications of the Fusion Power Source to the Electricity Utility Industry.  
Department of Energy (DOE) - Electrical Power Research Institute (EPRI).  
Prepared by Nichols and Associates Inc.  
U.S.A., October 1977.

- 47.- Informe de labores de PEMEX de 1981.  
Petróleos Mexicanos.  
México, 1981.
- 48.- Informe del Grupo Técnico sobre Energía de Biomasa.  
Segundo período de sesiones, Comité Preparatorio de las Naciones Unidas sobre Fuentes de Energía Nuevas y Renovables.  
A/Conf.100/PC/28, 28 de Enero de 1981, Asamblea General de --  
Las Naciones Unidas.
- 49.- Informe de Operación de 1981.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, 1982.
- 50.- Informe de operación de 1985.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, 1986.
- 51.- Informe sobre la Utilización de la Turba para la Producción de Energía.  
Comité Preparatorio de la Conferencia de las Naciones Unidas -  
sobre Fuentes de Energía Nuevas y Renovables, a realizarse en  
Nairobi, Kenia, del 10 al 21 de agosto de 1981.  
A/Conf.100/PC/32, Asamblea General de las Naciones Unidas.
- 52.- International Petroleum Encyclopedia.  
Peawell Publishing Co.  
U.S.A., 1984
- 53.- ISSACS, J.D.; SEYMOUR, R.J.  
The Ocean as a Power Resource.  
International Environmental Studies, vol. 4, 1973

- 54.- La Energía Nucleoeléctrica, el Medio Ambiente y el Hombre.  
Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA)  
México, 1984.
- 55.- Le Recherche.  
Las Nuevas Energías.  
Colección Muy Interesante, Biblioteca de Divulgación Científica.  
Ediciones Orbis.  
España, 1986.
- 56.- LUNDEN, Peter T.  
Potential Environment Consequences of Tidal Power Development --  
Seaward of Tidal Barrages.  
The oceans'81 conference record, 1981, (an international workpla-  
ce) Boston, Ma., proceedings, Piscataway, N.J., U.S.A. IEEE, ---  
voll, 1981.
- 57.- LARTIGUE, G. Juan; SOBERON, M. Jesús.  
El Litio: Nuevo Material Estratégico.  
Revista Ciencia y Desarrollo.  
Noviembre - diciembre.  
Num. 71, Año XII. 1986.
- 58.- La Tierra. Mares, Climas, Continentes.  
Serie Vida y Ciencia.  
Círculo de Lectores, 1985.
- 59.- Les Sciences.  
Les Combustibles Fossiles.  
Fascículo 196, pp 171-196.  
Ed. Crange - Bateliere.  
Paris, marz 1976.

- 60.- MAC CARNEY, J.F.: CATES, M.A.  
Selection of Power Sources for Remote Ocean Oriented Applications .  
Naval Undersea Center, San Diego, California, U.S.A.  
10<sup>th</sup> Intersociety Energy Conversion Engineering Conference.  
1975.
- 61.- MARIQUE, José A.; CARDENAS, Rafael S.  
Termodinámica.  
Ed. Harla.  
México, 1976
- 62.- MARTIN, J.M.  
Crecimiento Económico y Consumo de Energía.  
Revista Investigación Económica, Nos. 148-149, abril-septiembre 1979.  
Facultad de Economía, U.N.A.M.  
México, 1979.
- 63.- MARTINEZ, Manuel; MARTINEZ, Leal Ana María; CABEZUT, Boo Jorge.  
Apuntes de la Materia Tecnología y Economía de las Fuentes de Energía Nuevas y Renovables.  
Maestría en Ingeniería Energética, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.  
México, 1985
- 64.- MEADOWS, H. Donella; MEADOWS, L. Dennis.  
Los Límites del Crecimiento.  
Fondo de cultura económica.  
México, 1975.

- 65.- México 1983.  
Compendio de Datos y Estadísticas de México.  
Cámara Nacional de Comercio de la Ciudad de México.  
México, enero de 1984.
- 66.- MILEY, H. George.  
Overview of Nonelectrical Applications of Fusion Energy.  
Miami International Conference on Alternative Energy Sources, 2,  
1979, Miami Beach, FL., Proceedings, Coral Gables, FL: Clear ---  
energy Research Institutes - School of Engineering and Architec-  
ture.  
University of Miami.
- 67.- MING, Song  
La Chine s' Intéresse à l'Énergie Marémotrice.  
Revue de l'Énergie, n.337, septembre 1981.
- 68.- New Energy Resources Department Strategy Paper.  
Electric Power Research Institute (EPRI), study TPS 77-728.  
Prepared By Booz and Hamilton Inc.  
Final Report.  
U.S.A., January 1979.
- 69.- Nuclear Power Plants in the world.  
Edition N° 4, As of December 31, 1985.  
Japan Atomic Industrial Forum, Inc., 1986.
- 70.- NUNNELEE, Ellen.  
Nuclear Power Facts and Figures.  
INFODATA.  
April, 1986.

- 71.- Oil and Gas Journal  
Penwell Publication,  
weeks of december 22/29  
U.S.A., 1986.
- 72.- PATTERSON, C. Walter.  
La Energía Nuclear.  
Colección Muy Interesante, Biblioteca de Divulgación Científica.  
Ediciones Orbis., segunda edición.  
España, 1986.
- 73.- PENNEY, T.R.; SHELPUCK, B.  
An Overview and FY 1981 Progress on Open-Cycle OTEC Power Systems.  
The Oceans'81 Conference Record, 1981, (An International Workplace)  
Boston, Ma., proceedings, Piscataway, NJ., IEEE, vol 1.  
U.S.A., 1981.
- 74.- Plan de Desarrollo Nucleoeléctrico. Primera Etapa.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, 1981.
- 75.- Plan de Expansión del Sector Eléctrico al Año 2000.  
Tomo I, Anexo A: Pronóstico de la Demanda de Energía Eléctrica.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, 1978.

- 76.- Programa de Energía.  
Metas a 1990 y Proyecciones al Año 2000.  
Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.  
México, 1980.
- 77.- Programa Preliminar de Exploración de Lutitas Bituminosas en el Norte de México para la Generación de Electricidad.  
Superintendencia de Estudios Carboníferos, Comisión Federal de Electricidad.  
México, 1981.
- 78.- QUAYLE, G. Robert; CHANGERY, J. Michael.  
Estimates of Coastal Deepwater Wave Energy Potential for the World. The Oceans '81 Conference Record, 1981, (An International Workplace) Boston, Ma., Proceedings, Piscataway, NJ., IEEE, vol. 1. U.S.A., 1981.
- 79.- Realidades en Torno a la Energía.  
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) - Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA).  
México, Julio de 1984.
- 80.- Report of the Technical Panel on Fuelwood and Charcoal.  
Second session, Preparatory Committee for the United Nations Conference on New and Renewable Sources of Energy. A/Conf.100/PC/34. General Assembly, United Nations. February 25, 1981.

- 81.- Report of the Technical Panel on Ocean Energy.  
Second session, Preparatory Committee for the United Nations Conference on New and Renewable Sources of Energy. A/Conf.100/PC/25. General Assembly, United Nations. February 27, 1981.
- 82.- Report of the Technical Panel on Wind Energy.  
Second session, Preparatory Committee for the United Nations Conference on New and Renewable Sources of Energy. A/Conf.100/PC/24. General Assembly, United Nations. December 10, 1981.
- 83.- RESNICK, R.; HALLIDAY, D.  
Física (Para Estudiantes de Ciencias e Ingeniería).  
Tomos I y II. Ed. Continental, S.A., 9a. reimpresión.  
México, Septiembre de 1966.
- 84.- SCHMITT, Walter R.  
Marine Power - Accomplishments of the 1970s.  
Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 17, 1982,  
Los Angeles, Ca., Energy the Spark and Lifeline of Civilization,  
proceedings, Piscataway, NJ: IEEE, 1982.  
U.S.A., 1982.
- 85.- Seguridad en Plantas Nucleoeléctricas.  
Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Revista de la Asociación Mexicana de Ingenieros Mecánicos Electricistas A.C. (AMIME). Año XL.  
México, mayo-junio de 1986.

- 86.- SINGAL, R.K.  
Harnessing of Lunar Energy.  
Electrical India, vol. 24. n. 7., april 1985.
- 87.- SONNTAG, E. Richard; VAN WYLEN, J. Gordon.  
Introducción a la Termodinámica Clásica y Estadística.  
Ed. Limusa, 3a. reimpresión.  
México, 1985.
- 88.- Tormac Fusion Reactor.  
Electric Power Research Institute (EPRI), project 272.  
Prepared by Lawrence Berkeley Laboratory. Final Report.  
U.S.A., april 1979.
- 89.- Uranium Resources, Production and Demand.  
OECD Nuclear Energy Agency. International Atomic Energy Agency  
Report. April 1986.
- 90.- VIQUEIRA, Landa Jacinto.  
Apuntes de la Materia Energía y Desarrollo Económico.  
Maestría en Ingeniería Energética, División de Estudios de Pos-  
grado, Facultad de Ingeniería, UNAM.  
México, 1985.
- 91.- VIQUEIRA, Landa Jacinto.  
La Planeación del Sector Eléctrico y la Política Nacional de  
Energía.  
Facultad de Ingeniería, UNAM.  
México, 1981.

- 92.- VOLSHANIK, V.V. ; MATUSHEVSKII, G.V.  
Energy of Sea Wind Waves and Principles of its Conversion.  
Hidrotechnical Construction Magazine, vol. 19, n. 4.  
U.S.A., 1985
- 93.- WILSON, E.M.  
Tidal Power Reviewed.  
University of Salford, Int. Water Power Dam Construction, vol.  
35, n. 9.  
England, September 1983.
- 94.- WOODBRIDGE, D.D.  
Sources and Potential Uses of Wave Energy.  
Miami International Conference on Alternative Energy Sources, 2  
proceedings., Coral Gables, Florida: Clean Energy Research Ins-  
titute, School of Engineering and Architecture, University of -  
Miami, Miami Beach Florida.  
U.S.A., 1979.
- 95.- World Energy Demand to 2020.  
Energy Research Group, Cavendish Laboratory.  
University of Cambridge. Published by the World Energy Confe-  
rence, 1977.

Es buscando lo imposible como el hombre ha logrado y reconocido - lo posible, y aquellos que "sabia mente" se han limitado a lo que parece posible, no han dado jamás un paso.

- Mijail Bakunin -

SEGUNDA PARTE: LA GEOTERMIA.

Hay que leer mucho para aprender un poco.  
- San Agustín -

CAP III) GENERALIDADES.

III.1) Definición de Geotermia.

En general el término geotermia se refiere al calor natural existente en el interior de la tierra, independientemente de los factores que intervengan en sus manifestaciones superficiales. Este calor fluye por conducción directa a través de las rocas o bien es transportado por fluidos que ascienden por las fracturas hasta zonas porosas y permeables más o menos profundas para constituir los yacimientos geotérmicos.

Sin embargo es de uso común, que al hablarse de geotermia se refiera a la utilización de dicho calor interno, principalmente en forma de potencia y energía térmica, con el fin de satisfacer diversas necesidades del hombre, aunque a la fecha su principal utilización se encuentra en la producción de energía eléctrica.

Más específicamente, el término geotermia se aplica a la energía del agua caliente o vapor del subsuelo, y a los procesos que deben realizarse para su obtención, conducción y utilización en la generación de electricidad.

### III.2) Origen de la Energía Geotérmica Hidrotermal.

La distribución de la temperatura a través de la tierra se debe al flujo térmico que emana de la energía calorífica almacenada en su interior y fluye hacia la superficie, aunándose cualquier otro tipo de energía producida localmente, como por ejemplo el calor producido por las rocas radioactivas, que se ha demostrado es despreciable en comparación con el calor del interior, aunque pudiera llegar a tener importancia local en algunas zonas específicas.

Las corrientes de convección en el manto terrestre, junto con la actividad volcánica y la circulación hidrotermal dentro de la corteza, constituyen un mecanismo de transporte para formar depósitos hidrotermales relativamente cerca de la superficie. La zona cortical que se mueve en varias direcciones debido a corrientes convectivas en la astenósfera,\*\* ha formado placas oceánicas y continentales que chocan o se separan dando lugar a regiones de interacción geológicamente activas en las cuales ocurren la subducción de placas, las erupciones volcánicas y la construcción de montañas.

El proceso por el cual la energía térmica es transportada desde el interior de la tierra a la superficie, se inicia cuando el calor procedente de la cámara magnética asciende a través de fracturas existentes en la zona impermeable (formada por rocas de origen magmático), a la zona permeable en donde calienta los fluidos ahí presentes, que a su vez fluyen por dichas fracturas (pasando la capa sellado), hasta llegar a la superficie, en donde se manifiestan en forma de geysers, volcanes de lodo, fumarolas, solfataras, manantiales hidrotermales, etc.

\*\* Astenósfera: Zona limítrofe entre la corteza terrestre y la parte más externa del núcleo central del globo.

Estas manifestaciones termales superficiales generalmente no reflejan, en forma directa, la realidad respecto de las temperaturas de fondo y las de los flujos que se obtendrán mediante la perforación de pozos.

La temperatura de dichas manifestaciones dependerá básicamente de la temperatura interna del yacimiento; de la mezcla que tengan las mismas con las aguas superficiales; y de la estructura geológica del yacimiento, particularmente del grado de fracturamiento.

La proporción de agua y vapor de las maselas que salgan a la superficie, serán función de la presión y temperatura del yacimiento; y una vez que haya perforaciones, de la profundidad de los pozos.

Por lo que toca a la temperatura del yacimiento, esta dependerá fundamentalmente de su profundidad y cercanía a la fuente de calor (cámara magnética).

Muchas cámaras magnéticas pueden ser pequeñas y enfriarse en algunos años, y otras pueden cubrir varios  $\text{km}^3$ , permanecer energizadas durante miles de años y dar lugar a sistemas geotérmicos importantes que, en condiciones especiales, podrían llegar a constituir campos geotérmicos.

La cantidad de calor almacenado bajo la superficie de la tierra es mucho mayor que las necesidades futuras de energía de la humanidad.

En la tabla II.1, tomada del estudio del Electrical Power - Research Instituto (EPRI), para la XI Conferencia Mundial de Energía, realizada en 1981, se indican los recursos geotérmicos mundiales potenciales, que comprenden toda la energía térmica contenida en las rocas y fluidos subterráneos, con una temperatura mínima de 15° C, y situados a una profundidad máxima de 3,000 metros, así como la energía térmica y eléctrica que podría teóricamente extraerse de estos recursos.

TABLA II.1) RECURSOS GEOTÉRMICOS MUNDIALES

Rango de Temperaturas -°C	Recursos totales $10^{21}$ joules	Potencial térmico $10^{21}$ joules	Potencial eléctrico $10^{21}$ joules
< 100	36 000	2 600	0
100 - 150	3 800	270	0
150 - 200	1 100	68	17
> 250	73	3.5	0.9
T o t a l	40 973	2 941.5	17.9

La energía geotérmica es generada en forma continua por el flujo térmico procedente del interior de la tierra, y dado que este flujo es inmensamente grande, aunque repartido en un área muy grande, puede considerarse a la geotermia como una fuente renovable de energía, por lo menos en lo que toca a la producción de calor, aunque no necesariamente en lo que toca al fluido.

La explotación de la geotermia consiste en la utilización durante un período limitado, de un depósito finito, seguido a la vez de un período de duración variable, necesario para reabastecer el depósito. De hecho para poder seguir aprovechando este recurso, se deberá utilizar un fluido que realice de manera continua la transferencia del calor contenido en las rocas del yacimiento.

Por ello si un campo geotérmico se ve sometido a una sobre explotación, el recurso podría terminarse antes de tiempo, pero si se realiza una explotación racional (consumiendo menos fluidos que los que se producen, ya sea de manera natural o artificial, en el campo), se puede considerar a la geotermia, de una manera integral, como un recurso renovable.

Sin embargo, la explotación de la geotermia es una fuente renovable de energía es muy controvertido en el momento. Muchos especialistas afirman que no lo es, debido a dos razones principalmente, la primera de ellas se debe a que sostiene que el período necesario para el reabastecimiento del depósito que contiene los fluidos geotérmicos, puede llevar decenas o centenas de años, por lo que tomando como base la longitud de la vida humana, afirman debe considerarse a la geotermia como no renovable; la segunda se debe a que sostienen que para que la explotación del recurso pueda resultar atractiva desde el punto de vista económico, se requieren de ritmos comerciales de extracción muy grandes, los cuales necesariamente acabarán con dicho recurso.

En la actualidad existe una técnica que consiste en la --  
reinyección de las aguas de desecho, que permite la recarga hidro-  
lógica del yacimiento de manera artificial, y mantiene el ciclo de ex-  
plotación, y aunque todavía no es utilizada en todos los campos geo-  
técnicos del mundo (debido a los problemas prácticos y técnicos que  
presenta y que todavía no han podido ser resueltos satisfactoriamente), ayuda a corroborar la teoría de que la geotermia sí puede con-  
siderarse como una fuente renovable de energía.

En el capítulo V.3 el autor intenta complementar el por-  
qué considera a la geotermia como una fuente renovable.

En lo que respecta al origen del vapor geotérmico, las hipó-  
tesis existentes se pueden resumir en tres:

- Desprendimiento de vapor de enormes depósitos de agua confinada a temperaturas muy elevadas, que yacen en la profundidad de la tierra. Esta hipótesis presupone la existencia de acuíferos calientes cubiertos por capas impermeables.
  - Liberación del agua contenida en el magma fluido, en proceso de solidificación. Esta hipótesis se basa en el gran contenido de gases que muestran diversas aguas termales y explotaciones geotérmicas, que permiten suponer que el vapor se origina en el magma al realizarse la cristalización de las rocas por enfriamiento.
- Los gases contenidos en las zonas geotérmicas son muy variables, ya que en algunos campos, como el de Ahuachapán en El Salvador, son del orden de un 0.1% a un 0.2%, mientras que en o-

- tros, como el de Broadlands en Nueva Zelanda, llegan a un 7% del volumen del vapor separado de los flujos geotérmicos. Esta hipótesis se basa también en los resultados de muchos experimentos sobre la solubilidad del agua en los magmas graníticos y en observaciones directas realizadas en diversos volcanes del mundo, como el de Hekla en Islandia, y el Parícutín en México, que han permitido estimar que el magma al cristalizarse puede expulsar del 1 al 8% de su peso en agua en forma de vapor.
- Vapor producido por infiltración de agua meteórica al ponerse en contacto con rocas porosas a altas temperaturas, siendo esta hasta el momento la teoría más aceptada.\*\*

Es importante hacer mención que la mayoría de los especialistas concuerdan, en base a las evidencias, en que la mayor parte del vapor geotérmico se origina como consecuencia de la tercera hipótesis --- aquí mencionada, pudiendo complementarse con pequeñas cantidades de vapor producidas como consecuencia de la segunda hipótesis.

Esto es debido a que la composición típica de los fluidos obtenidos en los pozos geotérmicos implica que se trata, esencialmente, de agua meteórica antigua que ha tenido diversos grados de mezcla con fluidos ---principalmente gases--- que los especialistas citados sostienen son de origen indudablemente magmático.

\*\* En base a las evidencias químicas, White determinó en 1970 que al menos el 95% del agua de recarga de la mayoría de los campos geotérmicos en el mundo proviene de las aguas meteóricas dominantes locales, lo cual parece confirmarse en base a los estudios hechos por James (1970). Tomado de BOLTON, R.S., Management of a Geothermal Field. (1973). En: ARMSTEAD H. Christopher H.; Geothermal Energy Review of Research and Development, París: UNESCO

La explotación de la energía geotérmica requiere el transporte de calor a la superficie, en cantidades suficientes y de forma controlada, lo cual implica dos consideraciones: La primera de ellas, es que la energía geotérmica se debe obtener mediante perforación, y la segunda que debe ser transportada por un fluido que realice la transferencia de calor.

Los sistemas geotérmicos se han clasificado a lo largo del tiempo de diversas maneras, a continuación el autor presenta una clasificación que a su parecer es la mejor, y que está basada en modificaciones hechas a otras clasificaciones.

I) Sistemas Convectivos Hidrotermales.

- a) De Alta Energía o Alta Entalpía.
- b) De Baja Energía o Baja Entalpía.

Los sistemas de alta energía suelen dividirse a su vez en sistemas de vapor dominante, con entalpías del orden de 2,200 KJ/Kg y temperaturas de entre 230 y 240° C; y sistemas de líquido dominante - con entalpías de 1,400 a 1,800 KJ/Kg y temperaturas mayores a los 180° C. La utilización básica de ambos estriba en la producción de electricidad.

Por otro lado, los sistemas de baja energía tienen por el momento su principal utilización en proporcionar calor. Su entalpía es del orden de 300 a 1,400 KJ/Kg, y sus temperaturas van de los 15-°C a los 180 °C. Es importante mencionar que los sistemas con entalpías entre 900 y 1,400 KJ/Kg y temperaturas de 80 a 180 °C (que muchos autores denominan como de energía o entalpía intermedia), también son capaces de producir electricidad por medio de un ciclo binario, aunque por el momento, y con los costos actuales de los combustibles tradicionales, el costo del KWH geotérmico solo resulta competitivo cuando se produce con los sistemas de alta entalpía, y mediante ciclo directo.

## II) Sistemas Rocas Calientes.

- a) Rocas Secas y Calientes.
- b) Rocas Parcialmente Fundidas o Masas de Magma.

Las rocas secas y calientes presentan entalpías del orden de entre 3,000 y 5,500 KJ/Kg, y temperaturas en el rango de 370 a --650 °C. Por otro lado, las entalpías de las masas de magma andan entre los 5,500 y los 7,700 KJ/Kg, y temperaturas mayores a los ---650 °C.

## III) Sistemas Convectivos.

Estos consisten básicamente en los yacimientos geopresurizados, con entalpías entre los 900 y los 1,400 KJ/Kg y temperaturas entre los 100 y los 300 °C.

Hasta el momento no existen todavía campos geotérmicos comerciales basados en los sistemas ígneos o convectivos, aunque están en desarrollo ambiciosos programas en varios países, especialmente en Estados Unidos. Estos sistemas se discuten con mayor amplitud más adelante.

### III.3) Definición de Campo Geotérmico Hidrotérmal.

Es un área cuya superficie puede tener una extensión muy variable, bajo la cual existe un fluido con altas temperaturas, que es potencialmente aprovechable para la producción de electricidad (en el caso de que dichas temperaturas oscilen por los 180 o más grados-centígrados), o como fuente de calor si dichas temperaturas son menores.

En todo campo geotérmico hidrotérmal existe una acumulación de fluidos y de altas temperaturas.

Pero para que la acumulación térmica se mantenga elevada, se necesita que la circulación hidráulica natural dentro del acuífero sea lenta y que este tenga un espesor adecuado de rocas a altas temperaturas. La circulación lenta se presenta con mayor facilidad cuando la permeabilidad es baja, sin llegar a ser nula. Adicionalmente, la presencia de estructuras geológicas (elevaciones o depresiones corticales, fallas, y fracturas), pueden actuar como trampas para impedir la dispersión de las temperaturas a profundidad.

Estas condiciones impiden que la energía térmica de los acuíferos almacenada en la roca se difunda rápidamente en forma horizontal, perdiendo su valor económico.

Hay una serie de elementos indispensables para la existencia de un campo geotérmico, las cuales son a saber:

- Una fuente calorífica.
- El almacenamiento de un fluido bajo ciertas condiciones de presión y temperatura (estas suelen andar entre 180 y 350 °C para el caso de la temperatura y entre 50 y 250 bars para el caso de las presiones), que sirva como transmisor de calor.
- una buena permeabilidad de las rocas.
- Existencia de fallas y/o fracturas.
- Una zona impermeable superficial o subsuperficial (que impida la disipación de la energía almacenada, y permita la presurización del acuífero).
- Una recarga hidrológica que alimente al yacimiento. (Esta es una condición necesaria para poder considerar a la geotermia como una fuente renovable de energía).

\*\* Algunos autores establecen una diferencia entre sistema o campo geotérmico, y yacimiento geotérmico. En ella, el primer término implicaría únicamente el conjunto de características naturales mencionadas anteriormente (fuente de calor, existencia de fallas, rocas que actúan como sello, etc); mientras que el segundo implica condiciones económicas. Es decir, un yacimiento geotérmico sería un sistema geotérmico susceptible de ser aprovechado comercialmente para algún fin económico.

Bajo estas consideraciones, un yacimiento geotérmico sería un término relativo y variable, ya que un sistema que hoy no es rentable podría serlo en el futuro, o bien un sistema que, por ejemplo, en Japón podría ser considerado como yacimiento, en México puede no serlo. Sin embargo, como estos conceptos no son todavía de uso común por todos los autores, el que escribe no hará dicha diferenciación a lo largo de la obra.

Por otra parte, para que un campo pueda explotarse de manera económica, con la tecnología y costos actuales, será necesario — que se encuentre a una profundidad no mayor a los 3 Km. Aunque es claro que con mejores tecnologías y sobre todo si aumentan los costos de los combustibles tradicionales, las profundidades a las que resultará económica la explotación de los campos serán mayores.

Sin embargo al aumentar la profundidad, también aumentan — los problemas técnicos, muchos de ellos todavía no resueltos en la actualidad. El que escribe considera que la humanidad será capaz de desarrollar la tecnología adecuada para resolverlos.

#### III.4) Evolución Histórica en la Utilización de la Energía Geotérmica.

El uso de la energía geotérmica es muy antiguo y ha ido evolucionando con el transcurso del tiempo.

En un principio sus principales usos fueron exclusivamente para satisfacer necesidades de calor a través de sistemas de baja entalpía, después el hombre descubrió que podían aprovecharse también diversos minerales que salen a la superficie junto con los fluidos geotérmicos, por lo que procedió a su explotación.

Posteriormente, y gracias a la mayor cantidad de conocimientos y a la existencia de mejores tecnologías, se procedió a utilizar los campos geotérmicos de alta entalpía para la producción de electricidad, uso que se extendió notablemente debido a sus incuestionables ventajas, y que produjo un olvido de los primeros usos dados a la energía geotérmica.

En la actualidad la tendencia parece dirigirse a tratar de desarrollar los proyectos geotérmicos de una manera integral, esto es, utilizando tanto los sistemas de alta como de baja entalpía, como -- realizando la extracción de los minerales contenidos en los flujos geotérmicos.

Por otro lado, existe también un gran interés en la investigación y desarrollo de nuevos sistemas geotérmicos.

\*\* En el capítulo III.5 el autor trata más a fondo lo que ha denominado Otros Sistemas Geotérmicos.

### III.5) Otros Sistemas Geotérmicos.

Existen otros sistemas que bien dentro del término geotermia, y que no cumplen con todas las características de los campos geotérmicos hidrotermales.

Sin embargo, su importancia deberá crecer a futuro, debido a que presentan características muy importantes, como la mucho mayor potencialidad que los sistemas hidrotermales, y su mayor abundancia.

La razón de que su explotación no se realice de manera comercial en la actualidad, estriba en que su aprovechamiento plantea problemas técnicos y económicos que aún no han podido resolverse de manera satisfactoria.

De hecho, el hombre conoce muy poco, o casi nada, de lo que pasa en el interior de la tierra, y como la explotación de todos estos sistemas tiene que ver con ello, se hace por lo tanto necesario un mayor conocimiento de las profundidades de la corteza terrestre para así poder aprovecharlos.

Por ello ninguno de estos sistemas resulta competitivo por el momento, con las fuentes tradicionales de energía.

Estos sistemas son:

- a) Energía Geotérmica de Rocas Secas y Calientes.
- b) Energía Geotérmica de Zonas de Alta Presión.
- c) Energía Geotérmica de Masas de Magma.
- d) Energía Geotérmica Marina

a) Energía Geotérmica de Rocas Secas y Calientes.

Las masas rocosas y calientes pero secas, contienen una -- gran cantidad de calor, el cual no es fácil de extraer debido a su -- falta de porosidad natural y por ende de agua, la cual en circunstan-- cias normales es la que funciona como fluido transmisor de calor.

A esto se suma el hecho de que tampoco existen cauces natu-- rales a través de los cuales puedan circular dichos fluidos.

Debido a la baja conductividad térmica de las rocas se re-- quieren áreas muy grandes para la transferencia de calor, si se de-- sean obtener cantidades importantes de energía. Lo cual no es mu-- cho problema debido a que la cantidad de rocas secas y calientes den-- tro del subsuelo es muy grande. Barwellly Meidav estimaron en 1971 que la cantidad de regiones con gradientes térmicos varias veces su-- perior al normal (y que no presentan manifestaciones termales), es del orden de un décimo de la superficie de la tierra. De hecho mu-- chos geólogos concuerdan en afirmar que los sistemas de rocas secas y calientes tienen una incidencia por lo menos 2 o 3 veces mayor que la de los sistemas hidrotermales.

La abundancia de estos recursos trae como consecuencias fa-- vorables la reducción de las líneas de transmisión, debido a la loca-- lización más cercana a los consumidores, de las instalaciones geotér-- micas, además de que conforme se reduce la distancia de transmisión, aumenta también la eficiencia en la utilización, y las posibilidades

de mandar el agua caliente de forma directa a los consumidores, para fines como calefacción, refrigeración, o procesos industriales.

Sin embargo, uno de los problemas para la explotación de - estos sistemas se encuentra en que suelen encontrarse en niveles profundos de la corteza terrestre.

Por ello, el primer paso al tratar de desarrollar un reservorio geotérmico seco, consiste en la selección del sitio apropiado.

Lo cual deberá hacerse en una región con un gradiente térmico anormalmente alto, y en el que las rocas firmes calientes no se encuentren a profundidades muy grandes en el subsuelo.

Para su explotación, las teorías actuales plantean la creación de cauces permeables adecuados, que hagan posible la circulación en el interior de la roca seca y caliente, de un fluido que transporte el calor y lo lleve a la superficie. Para que esta transferencia de calor sea adecuada, se han planteado varios métodos, siendo el más aceptado el de provocar una explosión subterránea (con explosivos tradicionales o incluso con explosivos nucleares), que provoque una fractura isotrópica de la roca y permita un contacto directo entre el fluido transportador de calor y la roca en toda la parte de - esta que haya resultado mecánicamente afectada a consecuencia de la explosión.

Este método presenta los inconvenientes de necesitar de una gran potencia explosiva para poder fracturar la cantidad necesaria de rocas, lo cual puede resultar muy caro con los precios actuales de los explosivos.

Otro método que resulta menos ambicioso, pero que tampoco ha podido resolver el problema que representa la explotación de este tipo de sistemas, consiste en establecer un contacto limitado entre el líquido transportador de calor y la roca caliente. Este método se basa en la conductividad térmica natural de la roca para lograr la transferencia de calor a la zona de captación que podría ser, por ejemplo, una fisura producida mediante una fractura hidráulica o una fractura térmica.

La fractura hidráulica se realiza mediante el bombeo a presión de agua desde la superficie, dentro de un pozo perforado expresamente para ello. Cuando este pozo tiene la suficiente presión, se empezarán a formar fracturas en alguna parte del mismo. Estas fracturas crecerán conforme aumente la presión del bombeo, y seguirán creciendo mientras se logre mantener un bombeo mayor que las fugas debidas a la permeabilidad de las rocas. Estudios hechos en el laboratorio científico de Los Alamos por Harlow y Pracht en 1972, demostraron que los esfuerzos térmicos producidos por la contracción diferencial de las rocas debido a su enfriamiento por la inyección de agua, inducen fracturas adicionales, que se propagan por sí solas, lo que trae como consecuencia que el patrón de fracturas en rocas secas y calientes sea bastante más complicado que en las rocas frías.

En este último principio se basa el método de fractura térmico, que parece tener menos expectativas que el hidráulico, y el cual consiste básicamente en la inyección de agua fría en las rocas calientes, a fin de provocar fracturas debido a la contracción térmica de las mismas.

Tanto en el caso de fracturas hidráulicas como en el de térmicas, se tiene la ventaja de que una vez que se han creado - estas, los esfuerzos necesarios para hacerlas crecer serán menores que aquellos que se necesitaron para crearlas, lo cual fué demostrado por Kutter y Fairhurst en 1971. De hecho la competitividad económica de ambos sistemas depende sobremanera de la eficiencia con que se puedan fracturar las rocas, por lo que resulta muy importante mejorar a futuro las técnicas de fracturación y mantenimiento de permeabilidades.

En estudios experimentales hechos hasta el momento para tratar de obtener energía de las rocas secas y calientes, se ha demostrado que técnicamente es factible hacerlo, además parece ser que puede ser competitivo desde el punto de vista económico.

Sin embargo por el momento estos sistemas no lo son, - ya que para ello se necesita conocer la vida útil del sistema, - que aunque se ha estimado entre 10 a 15 años, aún no se ha podido determinar perfectamente. Además el hecho de que la roca se fracture adicionalmente como consecuencia de la inyección de agua fría, (en el fracturamiento hidráulico), ha abierto esperanzas, ya que se estima que aumenta la vida útil del sistema.

Por otro lado, los últimos estudios parecen confirmar la teoría de que estos recursos son renovables, lo cual abre grandes perspectivas a los mismos.

Entre las ventajas de los sistemas de rocas secas y calientes se tienen: Abundancia en todo el orbe; pérdidas de agua muy reducidas durante su explotación; y mínima contaminación debido a que no se desecha el agua extraída del subsuelo, sino que se recircula, mientras que en los sistemas hidrotermales el desecho del agua geotérmica sí representa un problema.

Un ejemplo típico de lo que podría ser la mejor técnica para aprovechar este recurso, es la que se ha estado aplicando, aún en plano experimental, en la caldera de Valles, Nuevo México, EUA, con la participación del Laboratorio Nacional de Los Alamos.

La técnica consiste en perforar primeramente un pozo -- hasta una profundidad en la que se alcancen temperaturas del orden de los 250 a 300° C; una vez alcanzado este objetivo, se perfora un segundo pozo cercano a una profundidad semejante, y se intenta producir el fracturamiento hidráulico de la roca cortada -- por el primer pozo, bombeando agua a elevadas presiones. Con esto se pretende inducir un sistema de fracturamientos que llegue hasta el segundo pozo, de tal manera que el agua fría que se bombea en el primer pozo pueda ser captada por el segundo pozo, pero a una temperatura mayor gracias a la cesión de calor de la roca -- por la que fluye entre uno y otro pozo.

Aunque en el primer intento realizado no se obtuvieron los resultados esperados (ya que solo pudo recuperarse en el segundo pozo una fracción del agua inyectada en el primero, y a temperaturas menores a los 150° C), se encuentra en proceso un segundo experimento, que espera resolver estos problemas, atribuidos a deficiencias técnicas superables, y no a la imposibilidad práctica de la teoría.

Por lo tanto si se demuestra que este sistema puede ser económico y competitivo con otros, la mayoría de los países del mundo podrían disponer de un potencial enorme y prácticamente infinito de calor, el cual podría utilizarse para la producción de electricidad o un sinnúmero más de aplicaciones.

Según estudios realizados se sabe que el potencial aprovechable con la tecnología que se desarrolla en la actualidad para ello, es equiparable al menos con la actual producción de energía.

Por ello se prevé que en un futuro se podrán instalar -- por este medio  $10^5$  Mw<sup>\*\*</sup>.

\*\* Informe del Grupo Técnico sobre Energía Geotérmica. 2o. período de sesiones. Comité Preparatorio de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Fuentes de Energía Nuevas y Renovables. O.N.U., 1980.

b) Energía Geotérmica de Zonas de Alta Presión.

Este recurso también conocido como zonas de geopresión, zonas geopresurizadas, o yacimientos geopresurizados, constituye otra de las potenciales fuentes de energía geotérmica a futuro.

Es común encontrar estas zonas en yacimientos sedimentarios con formaciones porosas permeables, y contienen líquidos sometidos a presiones y temperaturas anormalmente elevadas en comparación con las condiciones habituales.

El porqué de estas anomalías en zonas donde se esperan cantidades menores de presión y temperatura de acuerdo con el gradiente regional, no ha podido determinarse bien hasta el momento.

La información que se tiene de estas formaciones proviene básicamente de perforaciones realizadas en pozos petroleros en las costas de Louisiana y Texas, que han mostrado la existencia de depósitos subterráneos de agua caliente a profundidades de 4,000 a 6,000 metros, que se encuentran a presiones de hasta  $700 \text{ kg/cm}^2$ , con temperaturas del orden de 130 a 150 °C y saturada de gas natural, específicamente de metano, el cual por sí solo es ya una importante fuente de energía.\*\*\*

\*\* DORFMAN, H. Myron.  
The Outlook for Geopressured-Coothermal Energy and Associated Natural Gas.  
Distinguished Author Series, Journal of Petroleum Technology,  
U.S.A., September 1982.

\*\*\* En el documento intitulado Reservorios geotérmicos geopresurizados del Ing. Sergio Mercado se dan las siguientes cifras: profundidad que varía entre 2,000 y 7,000 m, presiones entre 350 y 850  $\text{kg/cm}^2$  y temperaturas de 100 a 200 °C, estas diferencias se deben más que nada a que todavía se conoce poco acerca de estas zonas.

Los yacimientos geopresurizados del Golfo de México son--  
enormes, alcanzan hasta 150 Km de ancho y se extienden desde el delta  
del Mississippi hasta el norte de México. Wilson estimó en 1975\*\*  
un potencial de 40,000 MW de energía a lo largo de la costa del Golfo  
de Texas, lo cual da una clara idea de la potencialidad de esta-  
fuente.

Se calcula que en la actualidad se conocen más de 60 zonas  
geopresurizadas en el mundo, debiendo haber muchas más por descubrir  
se.

Debido a que los yacimientos geopresurizados se caracteri-  
zan por tener tanto energía térmica, como energía hidráulica y gas-  
natural en solución, originalmente se creyó que podrían tener un --  
gran potencial para la producción de electricidad, ya que la ener-  
gía térmica y cinética contenida en el agua representa aproxima-da-  
mente el 50% de la energía contenida en el sistema,\*\*\*  
por lo que se pensaba que podría utilizarse dicha agua en la producción de electri-  
cidad.

\*\* Citado por MERCADO, Gonzalez Sergio., en Reservorios Geotérmi-  
cos Geopresurizados. Boletín 11E, pp 151-153, México, Julio/  
Agosto de 1986.

\*\*\* DORFMAN, H. Myron.  
The Outlook for Geopressured-Geothermal Energy and Associated-  
Natural Gas.  
Distinguished Author Series, Journal of Petroleum Technology.  
U.S.A., September 1982.

Sin embargo, conforme las investigaciones fueron progresando y se comprobó que las temperaturas de estos yacimientos son por lo general relativamente bajas (130-150° C), pero a mayor profundidad que los yacimientos geotérmicos tradicionales, - se ha desechado prácticamente por el momento la idea de producir electricidad, avocándose los estudios a tratar de demostrar la factibilidad técnica económica de utilizar estos recursos en diversos procesos que requieren calor, como la producción de papel azúcar, etc.

Por lo anterior, en la actualidad las principales investigaciones se han encaminado a tratar de obtener el metano disuelto en el agua. Se ha estimado de manera muy preliminar que la cantidad de metano recuperable de los yacimientos geopresurizados oscila entre 100 y 2,500 trillones de pies cúbicos.\*\*

La diferencia tan grande en el rango de metano recuperable se debe al grado de desconocimiento que se tiene, debido a - que la recuperación de gas depende de: La cantidad y calidad - de las arenas existentes en el medio ambiente de los depósitos - geopresurizados; los mecanismos de conducción de los acuíferos; y la temperatura, presión y salinidad del agua en el depósito.

Para llevar a cabo las investigaciones se están realizando en los Estados Unidos, pequeñas pruebas de aproximadamente una semana, utilizando para ello pozos perforados durante la exploración petrolera, y que fueron abandonados por sus operadores.

\*\* DOREMAN, H. Myron.  
The Outlook for Geopressured-Geothermal Energy and Associated Natural Gas.  
Distinguished Author Series, Journal of Petroleum Technology, U.S.A., September 1982.

El principal problema para la explotación comercial de los yacimientos geopresurizados, estriba en que no se tiene la suficiente información sobre la extensión y por lo tanto la capacidad unitaria de energía de estas zonas limitadas.

Por otra parte, se necesita determinar también el contenido y la duración de estos grandes depósitos de alta presión, establecer los aspectos técnicos y económicos para la eliminación de la salmuera, y definir las probabilidades de que como consecuencia de la explotación de este recurso se puedan presentar hundimientos en la superficie de la tierra, además de otros efectos ambientales.\*\*

Debido a todo ello no es posible calcular bien todavía la gama de aplicaciones de esta fuente de energía, ya que como puede verse, su explotación plantea problemas técnicos muy difíciles de resolver con el estado actual de la tecnología.

Debido a que en la zona noreste de la República Mexicana (particularmente en el estado de Tamaulipas), existen recursos geopresurizados es muy importante seguir muy de cerca lo realizado por los Estados Unidos en la zona, ya que de demostrarse la factibilidad técnico-económica de su explotación, podrían representar un recurso importante para el país, además de contribuir a los esfuerzos nacionales en pro de la diversificación de las fuentes de energía.

\*\* Informe del Grupo Técnico sobre Energía Geotérmica. 2o. período de sesiones, Comité Preparatorio de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Fuentes de Energía Nuevas y Renovables. ONU., 1980.

c) Energía Geotérmica de Masas de Magma.

Otra posible fuente de energía en el futuro, podría ser la utilización de los magmas más próximos a la superficie del suelo, ya que en las proximidades de las cámaras de magma que originan los volcanes, se producen flujos con un contenido calorífico muy alto.

El problema que se presenta para la potencial explotación de este tipo de recurso, estriba en que se necesita llegar hasta el magma, el cual en ocasiones puede encontrarse a una profundidad de varios miles de metros por debajo de los volcanes, lo cual con el estado actual de la tecnología no es todavía económicamente factible.

Otro gran problema que se presenta con esta fuente de energía, es que si bien su potencial es muy grande, presenta muchas interrogantes en lo que respecta a sus repercusiones sobre el medio ambiente.

Esto es, existe la posibilidad de que al extraer grandes cantidades de magma, y por ende de energía, de las zonas limítrofes de las placas por las cuales salen los fluidos asociados con el mismo, se pueda interferir en el equilibrio del planeta, lo cual podría llegar a ser trágico para la humanidad. Por todo ello, para poder utilizar este recurso como una probable fuente de energía, será necesario hacer antes rigurosos estudios que permitan determinar su factibilidad a futuro, además de sus posibles consecuencias.\*\*

\*\* Informe del Grupo Técnico sobre Energía Geotérmica.  
2o. Período de Sesiones, Comité Preparatorio de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Fuentes de Energía Nuevas y Renovables. O.N.U., 1980.

Sin embargo estos estudios están más que justificados, - debido a la potencialidad de esta fuente de energía. Según cálculos realizados por la Conferencia de las Naciones Unidas,<sup>\*\*\*</sup> la --- energía que se encuentra en los volcanes es del mismo orden de magnitud que el total de las reservas mundiales conocidas de combustibles fósiles.<sup>\*\*\*</sup>

Es prácticamente un hecho que no se podrá contar con este recurso hasta por lo menos entrado el próximo siglo, esto debido más que nada al desconocimiento que se tiene sobre el tema, y a las dificultades técnicas que presenta.

Una forma más de aprovechar esta energía, se encuentra - en los campos de lava caliente que se encuentran en la superficie debido a erupciones, o a flor de labio en los volcanes, presentando la ventaja de que podrían tener aplicación en un lapso más corto aunque también su potencialidad es bastante menor que la de los sistemas magnéticos a profundidad.

En estudios hechos principalmente en los Estados Unidos, se ha demostrado que la extracción de energía de estos magmas es - científicamente posible, y no existen problemas irresolubles que - la pudieran hacer imposible. Por lo que actualmente los estudios se avocan a tratar de demostrar la factibilidad de explotar económicamente estos recursos.

\*\* Informe del Grupo Técnico sobre Energía Geotérmica.

2° período de sesiones, Comité Preparatorio de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Fuentes de Energía Nuevas y Renovables. O.N.U., 1980.

\*\*\* Las reservas probadas mundiales de combustibles fósiles (que - son las que con la tecnología y costos actuales son susceptibles de aprovecharse), son del orden de 27,545 Exajoules (1 Exajoule =  $10^{18}$  joules). Para mayor información a este respecto consultar el capítulo II.1.1 correspondiente a los recursos convencionales no renovables.

Aunque las temperaturas asociadas con la explotación de las masas de magma son muy altas, estas no representan un problema serio, ya que el mayor problema lo constituyen los aspectos de corrosión.

Carson y Allen de los Laboratorios Sandia y del Departamento de Energía de los Estados Unidos respectivamente, determinaron que el desarrollo de los sistemas para la explotación de las masas de magma presentará varios problemas, siendo los más importantes: El desarrollo de técnicas para localizar los cuerpos de magma y los sistemas hidrotermales a su alrededor, de una manera confiable y precisa; el desarrollo de la habilidad necesaria para poder seleccionar los mejores puntos para la perforación en los recursos magnéticos; la determinación de los materiales adecuados tanto para los equipos de perforación, como para el sistema completo de explotación, de manera que puedan resistir medios ambientes tan hostiles como lo son aquellos con altas temperaturas y altamente corrosivos, por períodos lo suficientemente largos para resultar interesantes desde el punto de vista ingenieril y económico; y el diseño de los sistemas adecuados para la extracción de energía a altas temperaturas, de estos recursos.

De todo lo anterior, puede concluirse que ninguna de las dos opciones magnéticas es factible, al menos a corto plazo, debido principalmente a lo costoso de su explotación comparada con la de otras fuentes de energía.

d) Energía Geotérmica Marina.

En el sentido más amplio, un reservorio geotérmico submarino es un depósito natural de agua caliente bajo la superficie del fondo marino

Estos reservorios geotérmicos submarinos se manifiestan en el fondo oceánico a través de numerosas fuentes ténicas, también conocidas como ventilas hidrotermales submarinas, chimeneas hidrotermales, chimeneas negras, y humeros negros. Siendo muy frecuentes en el fondo del océano a lo largo de las dorsales submarinas donde tiene lugar la separación de grandes extensiones de la superficie de la tierra y se crea nueva corteza oceánica.

La situación de las chimeneas negras resulta bastante clara en base a la tectónica de placas. Esta teoría presupone la superficie terrestre formada por un conjunto de placas grandes y rígidas, -- que se mueven permanentemente unas con respecto a otras. Estas placas están constituidas en su mayor parte por corteza subyacente a los océanos, con grandes pedazos de material más ligero (que son los continentes), inmersos en ellas. En los bordes de colisión entre las placas, es donde la corteza antigua se destruye, mientras que en los bordes donde las placas se separan, es donde tiene lugar la formación de corteza nueva. Estos últimos se encuentran casi en su totalidad bajo los océanos y son estructuras lineales de unos 100 Km. de longitud, cortadas en zigzag por fallas de transformación de varios kilómetros.

Todo este complejo mecanismo de formación se debe a que el magma, que no es más que roca producida por la fusión parcial del manto, asciende en las dorsales; y su temperatura (que al llegar a la superficie es de unos 1,200° C) disminuye drásticamente hasta enfriarse, por lo que se solidifica formando corteza oceánica nueva.

A su vez, y a medida que el enfriamiento progresa, la corteza se separa lentamente, dejando con ello espacio para nuevas intrusiones, y dado que el material caliente se expande, las zonas de intrusión son elevadas, lo cual se manifiesta en las dorsales o cordilleras mesoocénicas, cuyas cimas se sitúan a profundidades de 2.5' a 3 km., y donde precisamente se pueden observar el mayor número de evidencias de la dinámica interior de la tierra, ya que ahí, por ejemplo, se encuentran los epicentros de una gran cantidad de sismos, o muchos de los volcanes submarinos, que en algunos casos, como el de Islandia, se constituyen en islas al emerger. Por otro lado, como el enfriamiento contrae los materiales, esto provoca que el fondo del océano subsida a medida que se aleja de las dorsales. De hecho, las fosas marinas son lugares donde las placas se sumergen en el interior plástico del manto terrestre.

En consecuencia, la mayor parte de los océanos (y por ende la mayor parte de la superficie de la tierra), cumple con la relación de un decrecimiento en su altitud con la raíz cuadrada de su edad.

El primer campo de fuentes termales submarinas se descubrió en 1977, en la cordillera oriental del Pacífico, próxima al Ecuador, en el área que se conoce como Cordillera de las Galápagos. Sin embargo no fué sino hasta 2 años después (1979), que se descubrieron y filmaron por primera vez las chimeneas negras en esa misma zona.

Su descubrimiento constituye indudablemente uno de los más notables de las ciencias oceanográficas y geológicas, en el siglo XX, y ha causado profundas repercusiones sobre las teorías y conceptos referentes a los procesos tectónicos que ocurren en las cordilleras mesoocénicas, así como en la ecología y evolución de los habitantes de las profundidades del mar.

De acuerdo con el modelo predictivo de ventilas hidrotermales de Ballard y Francheteau,\*\* el causante de la circulación del fluido hidrotermal en los sitios donde se forma piso oceánico, es el gradiente térmico que se produce entre la cámara de magma -- (cuyas temperaturas son del orden de los 1,200 a 1,400° C), y las bajas temperaturas que prevalecen en el fondo del océano (cerca de 2° C).

Cuando el agua fría se filtra en fisuras o fracturas - del fondo oceánico (donde existe una gran concentración de energía calorífica), se calienta a temperaturas del orden entre 300 y 350°C por lo que el agua disminuye su densidad y asciende desde humeros de sulfuros que se encuentran en el fondo oceánico, en forma de grandes chorros de agua negra cuya altura es variable y se ha calculado hasta en 15 m. De hecho, a temperaturas del orden de 300° C, y con presiones a nivel del mar, el agua ebullicaría de manera explosiva, como en el caso de los Geysers, sin embargo las altas presiones del fondo marino, mantienen el agua en fase líquida y permiten que se manifieste en forma de chorros.

\*\* Citado por SOTO, A. Luis; y MOLINA, Cruz Adolfo.  
Exploración Submarina de Ventilas Hidrotermales en la Cuenca - de Guaymas.  
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM., 1985.

El color negro de estas manifestaciones se debe a que en la boca de las mismas existe una mezcla muy rápida de las soluciones -- calientes, provenientes del interior, con el agua marina ambiental, -- fría. Se forma así el "humo" negro de la emanación, que en realidad se trata de una suspensión de finas partículas de sulfuro de -- hierro que precipitan de la solución.

Si bien las temperaturas en dichos chorros son muy altas, no lo son tanto en los campos termales, ya que alcanzan éstas valores de hasta 23° C, aunque para el promedio de estas profundidades, la temperatura es bastante elevada.

En estos últimos años, a partir de su descubrimiento, se ha ido comprobando que el agua que aportan las fuentes termales al -- mar tiene efectos muy importantes de diversa índole.

En primer lugar, se ha observado que la composición química del agua que emana de estas fuentes, y que es el resultado de un complejo conjunto de reacciones entre el agua de mar y las rocas cor ticales, recién formadas y calientes, alimenta una cadena de densas poblaciones de animales agrupados alrededor de las mismas. De ahí que se les haya llamado a estas zonas "Jardines del Edén", "Oasis", etc. Se encontraron de hecho arrecifes de mejillones, y campos de bivalvos y gusanos tubícolas gigantes, acompañados de anémonas, cangrejos, y grandes peces rosa, además de grandes cantidades de bacterias.

Estos organismos se localizan de una manera bastante selectiva, preferentemente en los orificios de mayor temperatura. En algunos casos los arrecifes de mejillones forman verdaderos conductos, canalizando de hecho la corriente de agua.

Esta abundancia ha creado cierto asombro entre los científicos ya que las profundidades abisales\*\* se han reconocido siempre por su poca densidad de biomasa, aunque con una considerable diversidad de especies. Ello se ha atribuido tradicionalmente a la falta de luz que se traduce en una disponibilidad muy restringida de nutrientes marinos en el fondo; las temperaturas tan bajas ( 2° C) que atentan la velocidad de las reacciones metabólicas; y las altas presiones hidrostáticas (mayores a 1,000 hbs), que ejercen un severo efecto en la naturaleza molecular de los complejos enzimáticos. Aunando se además, en el caso particular de las fuentes termales, el hecho de que estas desprenden emanaciones tóxicas de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S).

Se han propuesto dos teorías que tratan de explicar la gran cantidad de animales en las fuentes termales, la primera sostiene -- que como consecuencia del flujo térmico provocado por las ventilas, -- se origina una corriente convectiva que concentra los nutrientes dispersos en las aguas cercanas. La segunda establece que la formación de compuestos orgánicos se deriva de la actividad quimiosintética de bacterias sulfurosas capaces de obtener energía química a partir de -- la oxidación del ácido sulfhídrico. Las más recientes investigaciones parecen confirmar esta última teoría. Por lo tanto en estos sistemas el sol no sería la principal fuente de energía primaria, como -- en el caso de la fotosíntesis, sino que la principal fuente la constituye la quimiosíntesis bacteriana.

\*\* Propio de las grandes profundidades submarinas.

Es muy común que los organismos que viven en las fuentes termales presenten un gigantismo acentuado, como suele suceder en muchos de los ecosistemas aislados.

En segundo lugar, parece ser que las reacciones hidrotermales son la fuente principal de los sedimentos ricos en metales y los nódulos que tapizan el fondo marino, siendo su explotación un tema de debate en la actualidad. Además parece confirmarse la teoría de que muchos depósitos localizados sobre los continentes, y que se han explotados desde la antigüedad, tienen su origen en los campos termales, y su posición se debe a la dinámica de la tectónica de placas, posterior a su formación.

Las soluciones que surgen de las fuentes termales contienen una gran cantidad de minerales. En ellas se desprende entre 5 y 10 veces más litio y rubidio que el que vierten todos los ríos del mundo en el mar, y entre un tercio y la mitad de la cantidad de potasio, calcio, bario, y sílice. Presentando además enriquecimientos con respecto al agua de mar de hasta el orden de  $10^8$ , de hierro, zinc, cobre y níquel. Siendo importante también la producción de plata, manganeso y sulfuro de hidrógeno. Por otra parte, en estas fuentes se producen también los llamados sulfuros marinos polimetálicos, que son valiosos recursos estratégicos, aunque muy difíciles de explotar con la tecnología y costos actuales.

La explotación de todos estos minerales representa un desafío para la ciencia y tecnología moderna.

Por otra parte en las cadenas dorsales se consume la mayor parte del magnesio y sulfuro de los mares y se convierte en dióxido de carbono la mayoría del bicarbonato producido por la alteración de los continentes.

Es importante señalar que la deposición mineral junto a las fuentes termales, es por lo general pequeña, ya que la mayor parte de los mismos (que son transportados por las soluciones hidrotermales) - se convierten en partículas que oscurecen el agua a la salida de las mismas, y se dispersan con las corrientes que circulan por el fondo.

Por lo tanto su explotación no parece ser comercial, ya que no reeditaría lo suficiente, tomando en cuenta los esfuerzos e inversiones que requeriría. Parece ser mejor dejar que la naturaleza siga su curso y explotarlos cuando se hayan formado ya grandes depósitos, como en el caso del Mar Rojo.

En tercer lugar, se ha confirmado que el contenido químico del agua que brota de las fuentes termales, constituye una importante aportación a la composición química de los océanos.

Finalmente puede concluirse que por el momento la explotación de los depósitos geotérmicos marinos no es factible, y para que puedan serlo a futuro se necesitará que estos tengan altas temperatu-

ras, que sean porosos, permeables, grandes, superficiales, y cercanos a zonas terrestres de alta densidad poblacional y con deficiencias en su suministro de energía.

Por lo que toca a México, en mares territoriales como el Golfo de California, se han descubierto algunos de estos sistemas hidrotermales activos, por lo que resulta muy interesante su estudio, ya que a futuro podrían representar otra fuente alterna más de energía.

De todo lo anterior se desprende que por el momento la úica fuente geotérmica competitiva con las fuentes tradicionales, es - la denominada geotermia hidrotermal.

Es importante mencionar que aunque por el momento no sean competitivos los otros sistemas geotérmicos, es de vital importancia que los estudios e investigaciones sobre los mismos no se suspendan, ya que si no se disminuye de manera drástica el consumo mundial actual de energía para el año 2.000. o se encuentran nuevas fuentes de energía que sean capaces de satisfacer la demanda creciente de la migra, es bastante probable que la humanidad sufra para entonces una - crisis de energía (que podría ser grave), y que hasta el momento no se puede estimar en sus consecuencias.

A futuro estos sistemas podrían contribuir de - manera importante a satisfacer las necesidades mundiales de energía.

### III.6) Usos Alternos de la Energía Geotérmica.

Aunque el mayor desarrollo en materia geotérmica se ha centrado en los llamados sistemas de alta entalpía, alta temperatura o alto nivel, es muy importante darle un mayor énfasis al desarrollo de lo que se conoce como usos geotérmicos alternos, que consiste básicamente en la utilización de los sistemas de baja entalpía, y en la obtención de minerales de las salmueras geotérmicas.

Los sistemas de baja entalpía presentan tres ventajas básicas sobre los sistemas de alta entalpía, estas son:

- Son mucho más numerosos los campos geotérmicos de baja entalpía.
- Su explotación no requiere de las grandes inversiones e instalaciones de los sistemas de alta entalpía.
- Su diversidad de usos es mucho mayor.

Y si bien es cierto que no tienen la capacidad para resolver los problemas de energía que aquejan a la humanidad, si pueden ser una gran ayuda.

La utilización principal de los sistemas de alta entalpía consiste en aliviar cargas de energía eléctrica, aunque utilizando sistemas de cogeneración que aprovechen el vapor o mezclas sobrecalentadas, que generalmente salen con temperaturas más bajas (pero susceptibles de aprovecharse), se pueden aliviar también cargas importantes de energía calorífica e incluso de potencia en baja escala.

Por otra parte, los sistemas de baja entalpía deberán ser utilizados básicamente para aliviar cargas de energía térmica, y en algunos casos que las condiciones lo permitan, de potencia en baja-escala. Es importante mencionar el hecho de que al parecer los sistemas de baja entalpía, son mucho más abundantes en zonas volcánicas.\*\*

La utilización de la energía geotérmica de baja entalpía es mucho más antigua que la de alta entalpía, y según su temperatura su diversidad de usos puede ser muy amplia. Sin embargo, es apenas a últimas fechas que su uso se ha venido difundiendo.

Tomando en cuenta que los estudios realizados hasta el momento son todavía muy pocos, y en base a la diversidad y potencialidad del recurso, es de esperarse que la importancia a futuro de los sistemas de baja entalpía sea, con mucho, mayor a la actual.

En temperaturas cercanas a los 20 °C, la energía geotérmica puede utilizarse en la piscicultura, calentamiento de albercas, como fuente suplementaria de calor en la agricultura, etc.

A temperaturas mayores se puede utilizar en invernaderos, zootecnia, sistemas de refrigeración, calefacción a mayor escala, etc.

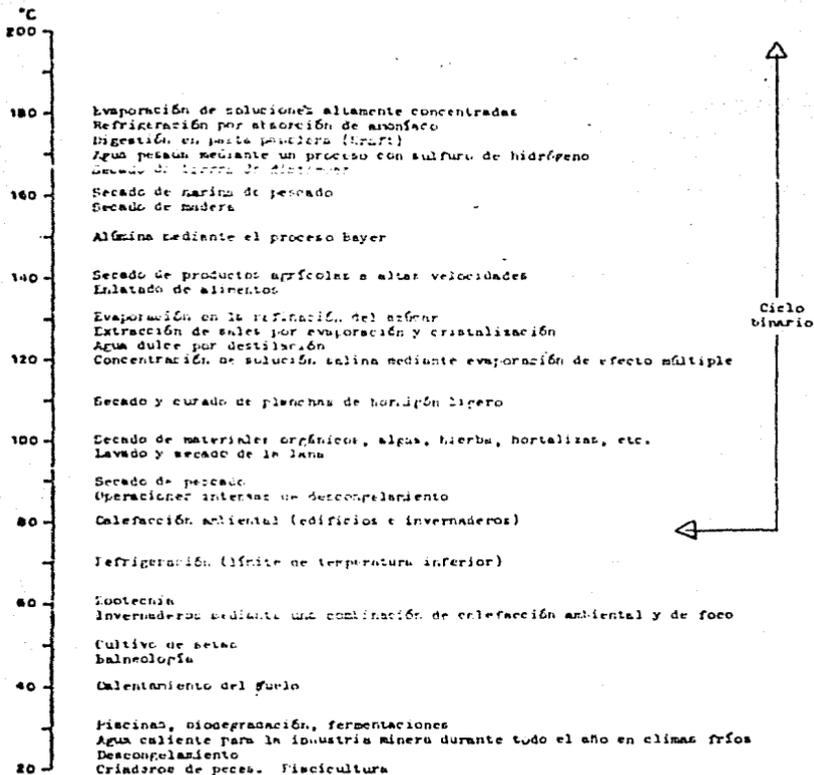
\*\* KRUGER, Paul; O'NE, Carol  
Geothermal Energy; Resources, Production and Stimulation.  
Stanford University, 1973.

Conforme las temperaturas aumentan, los usos crecen, a partir de los 70 - 80 °C, la energía geotérmica puede utilizarse en el secado de pescado, y de materiales orgánicos o inorgánicos; obtención de agua dulce; extracción de sales; desalinización del agua de mar; secado a altas velocidades; secado de madera; refrigeración, y un sinnúmero más de aplicaciones.

En la tabla II.2 y en la figura II.1 puede apreciarse con mayor detalle la gran cantidad de aplicaciones en las que es susceptible de aprovecharse la energía geotérmica de baja entalpía.

Otro uso potencial y también muy importante de la energía geotérmica, consiste en la utilización de los minerales que se encuentran en los fluidos geotérmicos. Cabe aclarar que el tipo y las cantidades recuperables de los mismos dependerá principalmente de las características estructurales de cada campo.

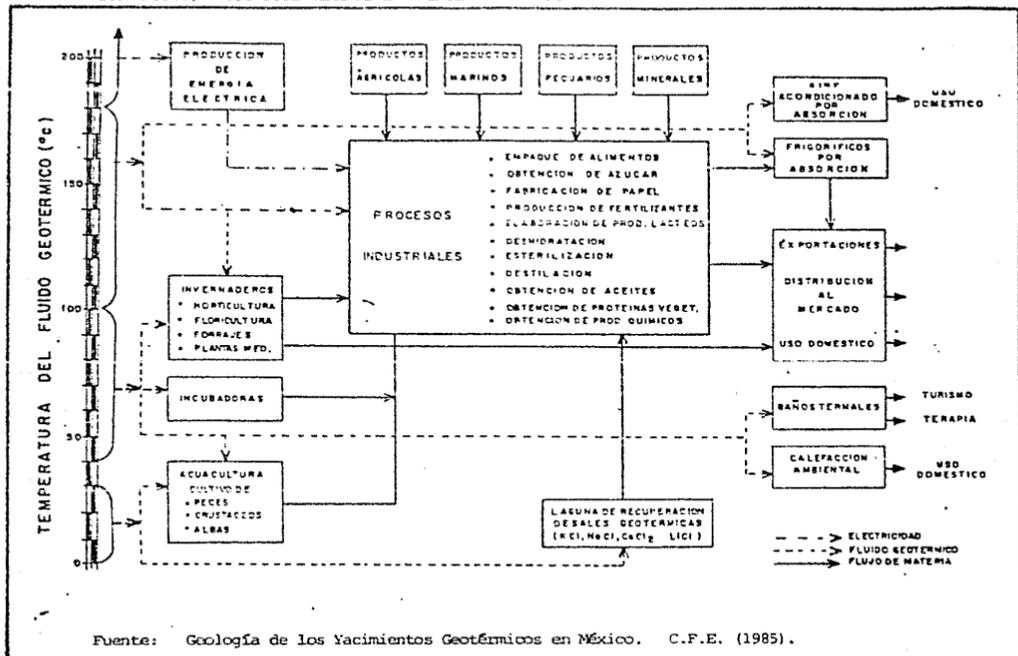
Tabla II.2) Temperatura aproximada de los fluidos geotérmicos necesaria para distintas aplicaciones



Fuente: Adaptado de Linba, *Geothermal Energy, Review of Research and Development, Earth Sciences No. 12* (París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 1975).

...

FIGURA II.1) USO POTENCIAL DE LA ENERGIA GEOTERMICA



Fuente: Geología de los Yacimientos Geotérmicos en México. C.F.E. (1985).

El placer de escribir es el mismo de leer, sublimado por unas notas más - de intimidad.

- Stendhal -

#### CAP IV) LA GEOTERMIA EN EL MUNDO.

##### IV.1) Antecedentes.

Como se mencionó anteriormente, el progreso y desarrollo de la humanidad depende en un porcentaje muy elevado de sus fuentes de energía.

Por otra parte esta dependencia se hace cada día mayor, ya que el hombre industrializado utiliza cada vez más para satisfacer sus necesidades, implementos que requieren a la vez de una menor cantidad de energía humana y una mayor cantidad de energía de otros tipos.

Aunado a ello, se tiene el hecho de que el crecimiento de las necesidades de energía es exponencial, de la misma manera que lo es el de las poblaciones. Así que, si se suman las necesidades per cápita de energía cada vez mayores, con una necesidad global, también cada día mayor, se ve que la situación podría ser alarmante en un futuro próximo.\*\*

Y aún más, va que las fuentes de energía no renovables, tienden a escasear cada vez más y su obtención resulta más cara.

En la actualidad aproximadamente el 85% de las necesidades mundiales de energía son cubiertas con fuentes como el petróleo, el gas natural, el carbón y el uranio, todas ellas no renovables, -- por lo que se aprecia de una manera muy clara la necesidad imperiosa de la humanidad de diversificar sus fuentes de energía, y entre más pronto se haga, mejores serán los resultados.

\*\* MEADOWS, H. Donella y otros autores.  
Los Límites del Crecimiento, Informe del Club de Roma sobre el Predicamento de la Humanidad.  
Ed. F.C.E., México, 1975.

Como puede verse, actualmente solo el 15% de las necesidades mundiales de energía se cubren con otro tipo de fuentes, siendo estas la energía hidráulica, geotérmica y la biomasa, específicamente con el consumo de madera y carbón vegetal.

Por eso muchos países están dedicando grandes recursos humanos y económicos al desarrollo de la geotermia.

La razón de que se dedican tantos esfuerzos al desarrollo de esta fuente, estriba más que nada en la gran potencialidad que a futuro pueden tener tanto los sistemas geotérmicos hidrotermales; como los no tradicionales (los cuales no se encuentran todavía bien desarrollados), independientemente del ahorro económico que su utilización representa.

Se estima en cifras muy a "grosso modo", que los recursos geotérmicos hidrotermales mundiales, con la actual tecnología que --permite recuperar aproximadamente un 30%\*\* de la energía contenida en este tipo de yacimientos, son de aproximadamente 150,000 MW.

Este 30% es variable, ya que en campos con producción de vapor sobrecalentado básicamente, esta cantidad puede llegar hasta un 50%, mientras que en los campos con mezcla predominante de agua--vapor, este porcentaje es aún menor al 30%.

\*\* Información proporcionada al autor por el M.C. Mario C. Suárez - Arriaga, de la Oficina de Pruebas y Modelos de Simulación, del Departamento de Evaluación de Yacimientos, de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, de la C.F.E.

Además hay que tener en cuenta que ese 30% se aprovecha con un factor de recuperación de 0.02 en promedio, donde el factor de recuperación es la fracción del calor total almacenado que puede recuperarse en forma de energía eléctrica\*\*.

Así que si se piensa en las inmensas cantidades de energía almacenadas en el interior de la tierra, se puede ver que mejorando la eficiencia de recuperación, y las tecnologías utilizadas actualmente, las cantidades susceptibles de aprovecharse son prácticamente infinitas e incuantificables por el momento.

Por otra parte, pensando que muchos de los países con centros geotérmicos no tienen hidrocarburos, se podrá apreciar aún mejor la importancia de esta fuente de energía, no solo en los momentos actuales, sino también la que puede y debe tener en el futuro.

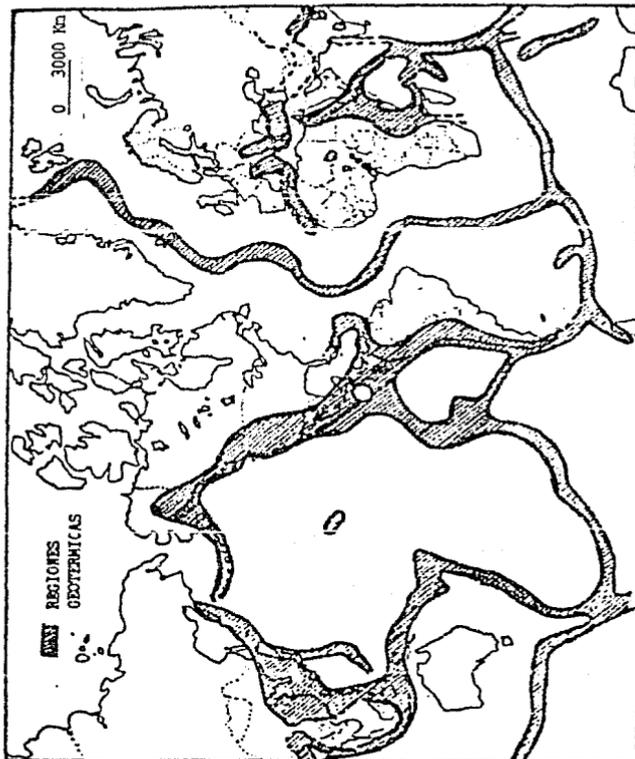
En la figura II.2 se muestran las regiones geotérmicas del mundo.

Como puede apreciarse de la misma, existe una estrecha correlación entre las zonas de debilidad cortical, que son los lugares donde se juntan o separan las placas continentales, y las zonas con alto potencial geotérmico. Esta relación era lógica de esperarse, debido a que las cámaras volcánicas son las principales fuentes de calor.

Por lo que respecta a la extracción de la energía geotérmica, la mayor parte de los especialistas concuerdan en que es extremadamente improbable que pueda afectar la dinámica de las placas tectónicas. Aunque por el hecho de existir esa pequeña probabilidad sería conveniente realizar estudios más profundos al respecto.

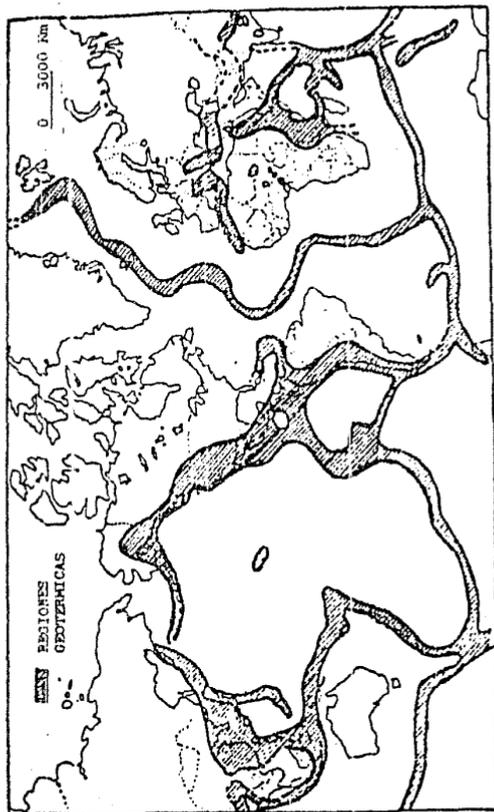
\*\* MERCADO, González Sergio; GUIZA, Lambarri Jorge. Evaluación Preliminar de los Recursos Geotérmicos en México. México, 1977

FIGURA 11.2) REGIONES GEOTERMICAS DEL MUNDO



Fuente: Meidav, Oil and Gas Journal; vol. 72, No. 19 (1974)

FIGURA 11.2) REGIONES GEOTERMICAS DEL MUNDO



Fuente: Meidav, Oil and Gas Journal; vol. 72, No. 19 (1974)

Como se ve del mapa anterior, las regiones con posibilidades geotérmicas abarcan zonas inmensas de la superficie de la tierra, y si a esto se suma la posibilidad de que a futuro se puedan aprovechar -- las zonas geotérmicas existentes debajo de los océanos, podrá verse que la potencialidad de esta fuente de energía es enorme, y mucho mayor que las necesidades totales actuales de energía.

Es importante mencionar que uno de los problemas que se -- presenta en geotermia, es que la manera más eficiente de aprovecharla es como calor directo y no como potencia, sin embargo en la actualidad su -- principal uso se realiza en forma de potencia (producción de electricidad) y no de calor.

Por lo tanto para que la geotermia sea competitiva (en forma de potencia) se necesita que el componente de energía del costo del -- producto final sea alto y el costo de otro tipo de combustible sea considerablemente más alto, por lo que es recomendable que la utilización de este tipo de energético se haga en el propio campo, o a pocos kilómetros de él, ya que el transporte del fluido geotérmico que efectúa la transferencia de calor a zonas que no se encuentran cercanas al campo, resulta muy costoso y por el momento no recomendable.

Aunque es claro que el fluido geotérmico puede utilizarse no solo como calor, sino también para la producción de electricidad, la cual es más fácil de transportar (aunque no necesariamente más barata), -- también es claro que desde el punto de vista termodinámico, la eficiencia es mucho menor, ya que la máxima eficiencia se obtiene utilizando -- los fluidos geotérmicos como fuente de calor, sin embargo la determinación de su uso radica básicamente en cuestiones económicas y no técnicas.

#### IV.2) Evolución y perspectivas.

La utilización de la energía geotérmica por el hombre se remonta a épocas muy lejanas.

Desde hace mucho tiempo atrás se utilizaban las afloraciones superficiales (fuentes termales, manantiales, etc) para cocinar alimentos sumergiéndolos en ellas, y para el baño de las poblaciones cercanas a las mismas.

Hace dos mil años los romanos utilizaban las aguas de los manantiales calientes para calentar sus baños, bañándose también en manantiales de agua caliente en las orillas del río Danubio.

En la Edad Media fue muy común el uso de los manantiales--termales naturales para abastecer a los hogares de agua caliente, y para la calefacción de los mismos. En las ciudades de Chaudes Aygues, Dax, y Aix-les-Thermes en Francia, se viene distribuyendo agua caliente con una temperatura de 80 °C desde esa época.

En el siglo XVIII se fundaron en Hungría varios institutos balneológicos, con el fin de aprovechar las propiedades terapéuticas de las aguas geotérmicas, continuando en operación todavía algunos de ellos. En ese siglo se inició también la explotación del ácido bórico contenido en las aguas geotérmicas de Larderello.

Sin embargo es en los principios del presente siglo que se hacen las primeras tentativas (muy fructíferas por cierto), para la explotación de la geotermia con el fin de producir electricidad.

Estas tuvieron lugar en 1904, en Larderello, región nor-occidental de la provincia Toscana en Italia, y fueron realizadas -- por el Príncipe Piero Ginori Conti, utilizando una máquina recíproca para recibir el vapor previamente separado del agua. Esta máquina era del tipo de escapes no condensables a la atmósfera, y producía cerca de 15 KW de electricidad de un generador de corriente directa, con el fin de proveer la iluminación de la fábrica de ácido bórico de Larderello. La máquina original fue reemplazada por un turbogenerador de 250 KW en 1913, y esto es lo que marcó propiamente el inicio, a escala comercial, de la producción de electricidad a través de la energía geotérmica.

Gracias a lo anterior, quedó a la vista la potencialidad de la geotermia, por lo que muchos países siguieron el ejemplo de Italia durante el decenio de 1920.

Entre ellos se tienen a los E.U.A., Indonesia, Nueva Zelanda, y el Japón. Algún tiempo después otros países entraron también al "Grupo Geotérmico", entre los que se cuentan Filipinas, Islandia, México, Unión Soviética, El Salvador, Nicaragua, etc.

Hay que mencionar que en el caso de Larderello fue relativamente fácil la utilización de la energía geotérmica para la producción de electricidad, debido a que se trataba de un campo con vapor sobrecalentado, sin embargo la utilización en gran escala de los

campos geotérmicos hidrotermales con líquidos dominantes no fue posible hasta que se puso en marcha la planta de Wairakei en Nueva Zelanda en 1958.

En el presente la geotermia es ya una realidad a nivel mundial, de ahí que su participación no pueda menospreciarse ni olvidarse.

Actualmente se tienen instalados en el mundo 4,762 MW<sub>e</sub>, en 186 unidades, siendo 17 países los que la utilizan para producir electricidad.

En la tabla II.3 se muestra la capacidad instalada mundial de energía geotérmica para la producción de electricidad.

De los campos geotérmicos utilizados en la producción de electricidad, el 45% son campos con producción de vapor seco o sobrecalentado, y el 55% restante son campos productores con una mezcla de agua-vapor.\*\*

El 30% de ellos utiliza turbogeneradores de 5 MW, el 65% de alrededor de 30 MW, y solo el 5% son de mayor capacidad.\*\*\*

\*\* ALONSO, Espinosa Hector.  
Geotermia, Una Fuente Alternativa de Energía para la producción de Electricidad.  
Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad. México, Agosto de 1984.

\*\*\* Idem al anterior.

Los más grandes del mundo se encuentran en el campo de los Geysers, en E.U.A., con 135 MW en una sola unidad, y otras dos unidades de 115 MW cada una; y en Cerro Prieto, México, con 4 unidades de 110 MW cada una. En el citado campo de los Geysers, se tiene planeada una unidad de 140 MW que entrará en operación en 1990 y que pasará a ser la más grande del mundo.

Sin embargo, y a pesar de todo lo anterior, algunos expertos expresan con cierto optimismo que la energía de las fuentes geotérmicas pueda cubrir el 1% del total de las necesidades mundiales de energía para el año de 1990, posición que deberá afianzarse y tal vez incrementarse muy levemente para el año 2,000.

Hay que aclarar que aunque a nivel mundial el papel de la geotermia no es muy grande, sí lo es para ciertos países, particularmente para aquellos en vías de desarrollo. En algunos países desarrollados como Italia, Japón y los EUA la producción de energía eléctrica a través de la geotermia representa el 1, 0.1, y 0.3% del total respectivamente, mientras que en países en vías de desarrollo como El Salvador, Nicaragua, México, Filipinas y Kenia representa el 18.9, 9.5, 3.2, 17.5, y 8.3 respectivamente del total de producción de energía eléctrica (a 1985).

Puede verse que a pesar de que la importancia relativa de la geotermia a nivel mundial es pequeña, no lo es su importancia a nivel absoluto, ya que este porcentaje representa una cantidad enorme de energía, y un ahorro económico muy importante de hidrocarburos.

Además este 1% es una cantidad cada vez mayor en valor absoluto, ya que la producción de energía es mayor conforme pase el tiempo.

TABLA II.3) CAPACIDAD INSTALADA ACUMULADA OBTENIDA DE ENERGIA GEOTERMICA.

( 1985 )

<u>PAIS</u>	<u># DE UNIDADES</u>	<u>CAPACIDAD INSTALADA</u> ( MW )
ESTADOS UNIDOS	56	2 022
FILIPINAS	21	894
MEXICO	14	645
ITALIA	43	519
JAPON	9	215
NUEVA ZELANDA	10	167
EL SALVADOR	3	95
KENYA	3	45
ISLANDIA	5	39
NICARAGUA	1	35
INDONESIA	3	32
TURKIA	2	20
CHINA	12	14
UNION SOVIETICA	1	11
FRANCIA (ISLAS GUADALUPE)	1	4
PORTUGAL (ISLAS AZORES)	1	3
GRECIA (MILOS)	1	2
	<hr/> 186	<hr/> 4 762 Mw.

Fuente: DiPippo, Ronald. Geothermal Electric Power, The State of the World. (1985).

En la actualidad el total de la capacidad instalada para la producción de energía eléctrica a partir de fuentes geotérmicas - en el mundo, asciende a cerca de 5 GW., que si bien no parecen ser -- muy importantes a nivel relativo, si lo son a nivel absoluto, debido a las razones explicadas anteriormente.

En base a todo lo anterior, y al éxito que se ha tenido - en todo el mundo en la utilización de los sistemas geotérmicos, además de su posible gran potencialidad a futuro, muchos países realizan ya en la actualidad estudios y exploraciones con miras a incorporarse al todavía pequeño "grupo geotérmico".

### IV.3) Actuales Usos Alternos en el Mundo.\*\*

El principal uso actual es en baños y clínicas termales - (en lo que respecta a M<sub>v</sub> producidos). Por ejemplo, en Italia funcionan en la actualidad más de 200 clínicas termales, en las que reciben tratamiento 15 millones de personas al año, y en Rusia son -- cerca de 10 millones los pacientes que utilizan las curas con agua térmica (Crenoterapia). El uso de la crenoterapia resulta interesante ya que podría contribuir, junto con todos los otros usos alternos, a hacer más interesantes los proyectos geotérmicos. En Japón y Nueva Zelanda, es muy común la utilización del agua caliente geotérmica en baños públicos, siendo el primero de ellos, líder mundial en dicha utilización.

La segunda utilización en importancia en la actualidad, es en la calefacción doméstica y de edificios públicos y privados.

Probablemente la utilización más antigua en gran escala -- con estos fines, sea la que se ha venido haciendo desde 1890 en Boise, Idaho, E.U.A., en donde se obtiene agua a 77°C, la cual se bombea de dos pozos a 130 m. de profundidad, que hasta el momento, y a pesar de tener ya casi 100 años trabajando, no han disminuido su producción, y su contenido de sales sigue siendo tan pequeño como al -- principio, a pesar de proveer a 180 casas de un área residencial de Warm Springs y de que en alguna época abastecieron a cerca de 400 edificios.

\*\* Este capítulo se trata en realidad de un resumen de su homónimo Los Dones de la Madre Tierra, del libro La Energía de la Tierra del Ing. J.L. Hernández Galán, complementado con notas personales y datos obtenidos de otras publicaciones, todas ellas incluidas en las referencias.

También en Klamath Falls, Oregon, se ha utilizado el calor geotérmico, para los mismos fines desde comienzos de siglo, teniéndose perforados en la actualidad cerca de 400 pozos a profundidades que varían entre 27 y 580 m, los cuales producen aguas a temperaturas de 38 a 100° C. y que se aprovechan en la calefacción de unas 500 casas, 15 edificios gubernamentales y el centro financiero de la ciudad, esperándose cubrir a corto plazo, una zona de 54 manzanas de casas. En Reyjavik, Islandia se cuenta con un sistema de calefacción municipal, el cual funciona con muy buenos resultados desde 1930, y que da servicio a cerca de 110 000 personas, contando dentro de ellas a los habitantes de tres poblaciones cercanas, con lo que el 70% de la población se ve beneficiada con este sistema. El agua proviene de 33 pozos perforados en 4 zonas, y se obtiene a temperaturas de aproximadamente 80° C.

Además, esta agua se utiliza también para fines domésticos - ya que es para bacteriológica y químicamente hablando, por lo que se utiliza para consumo directo.

Por otra parte, el costo de esta agua caliente, oscila entre el 15 y el 19% del costo del mismo servicio mediante petróleo, lo cual da una idea de lo eficiente, útil y económico que puede resultar la utilización de esta fuente.

En la Cuenca de París existe un sistema de calefacción, que funciona gracias a cerca de 2000 pozos, los cuales proveen de agua caliente a 57° C a toda esa región, es importante mencionar aquí que dichos pozos fueron perforados inicialmente con la idea de obtener petróleo, y aunque no se obtuvo, sí se obtuvo agua caliente, con lo que los gastos de exploración geotérmica, que suelen ser muy elevados, no se realizaron, ya que se cargaron a la prospección petrolera.

En 1969 se realizó la primera instalación de este tipo, en Melún, unos 40 Km. al sudeste de París, y actualmente sirve a 400 apartamentos, un número similar aprovecha el calor geotérmico, desde 1976, en Creil, 40 Km. al norte de París, proveyendo el 40% de el calor necesario para calefacción. En Villeneuve-La-Garonne, zona aledaña a París, se proporciona calefacción geotérmica a 1700 apartamentos, mientras que en Meur-sur-Seine, se provee a 6000 apartamentos y 50 000 m<sup>2</sup> de oficinas, del mismo calor.

En Nueva Zelanda y Japón es solamente utilizado el vapor geotérmico, con los mismos fines de calefacción.

Mientras que en Hungría, se provee de calefacción a 3 500 departamentos, con varios cientos de pozos a 2 000 m. de profundidad los cuales dan agua entre los 60 y los 100 °C.

En Larderello, Italia, se da calefacción a 120 000 m<sup>3</sup> de casas y edificios.

En Puga y Chumtang, en el Himalaya, a 4 500 m. s.n.m., en una zona donde las temperaturas son del orden de los 10 °C en el Verano y los 40 °C bajo cero en el invierno, se provee vapor y agua a 125 °C., obtenida de profundidades de 20 a 30 m., para calefacción doméstica.

A pesar de que los baños termales y la calefacción son la principal aplicación de la energía geotérmica de baja entalpía, no son estas las únicas, ya que su diversidad puede ser prácticamente tan amplia como pueda ser la imaginación de sus usuarios.

En Whitehorse, por ejemplo, en el Yukón, al noroeste de Canadá, se obtiene agua a solo 7 °C, pero dado que las temperaturas promedio de la zona son menores, se utiliza mezclándola con las aguas superficiales del servicio municipal, para que no se congelen las tuberías de distribución.

En Klamath Falls, aparte de los usos de calefacción, se utiliza también el agua para el calentamiento de piscinas, instalaciones para fundir la nieve de las aceras, y para proporcionar calor a una planta pasteurizadora de leche.

En la India, en la misma zona de Paga y Churutaraj en los Himalayas, se utilizan el agua y el vapor geotérmico en invernaderos que cultivan con mucho éxito verduras, frutas y flores, entre ellos tomates, fresas y petunias. En Islandia se cuenta con invernaderos geotérmicos en los que se producen plátanos y otras frutas tropicales, así como flores y hortalizas, en una superficie de más de 140 000 m<sup>2</sup>, todo ello a pesar de que Islandia se encuentra en los límites del casquete polar.

Sin embargo, el país más avanzado en invernaderos geotérmicos es Hungría, el cual cuenta con más de 1 700 Ha., en donde se cultivan verduras de alto precio, como en los alrededores de Szentes en donde se producen los pimientos rojos, utilizados en la fabricación de la famosa paprika.

También en Rusia se cuenta con invernaderos geotérmicos en los cuales se obtienen cosechas de más de 1 000 ton. de tomates y pepinos. En Italia, en la región de Larderello se tiene una superficie de 7 000 m<sup>2</sup> de invernaderos, mientras que en California - en E.U.A., se cultivan tomates, lechugas, pepinos, pimientos, gladiolas, etc. sobre lechos hidropónicos de grava, en invernaderos calentados con aguas termales. En Turquía, en el campo de Kizildere se cuenta también con invernaderos geotérmicos, además de que en la localidad de Agamemnoni, se aprovechan las aguas que brotan a 70° C de un manantial, para el hamán\*\*, y se descargan por un canal abierto a los campos de cultivo, los cuales según los lugareños producen cosechas más grandes que las irrigadas por otros medios. (Esto sin saberse plenamente si se debe a las sales que contienen o a su temperatura, lo cual sería muy interesante que se investigara a futuro).

\*\* Hamán: baño utilizado por los turcos, semejante al Tenazcalli utilizado en México

Japón es otro de los países que utiliza invernaderos geotérmicos, con muy buenos resultados.

En Filipinas, se utiliza el calor geotérmico, para el secado de granos, mientras que en Kannawa, Beppu, Oita y otros lugares—del Japón, se utiliza para el secado de arroz, en Broadlands, Nueva-Zelanda en el de araita, y en Islandia en el de las algas, en una planta que produce 3 600 t. anuales de algas secas para exportación.

En Islandia y Japón, se utiliza también el calor geotérmico para secar pescado, y calentar el agua de criaderos piscícolas,—lo que se ha volcado en un desarrollo más rápido de especies de alto precio, como el salmón, carpa y anguila.

En Ueda, Minzmitzu, Beppu, y Oita, en el Japón, existen grandes granjas avícolas, algunas con más de 8 000 animales, en las que el agua geotérmica se circula por tuberías enterradas bajo el piso de los gallineros, de tal forma que el excremento de las aves se seca—prácticamente en el momento en que toca el suelo.

Mientras que en Taupo, Nueva Zelanda, se utiliza el calor-geotérmico para cocer y esterilizar desperdicios de comida con que—se alimenta a los puercos, y en Kawerau y Rotorua en el mismo país—se utilizan estufas para secado de madera; en las que el aire se calienta con vapor geotérmico.

Otros usos más son el de limpieza de instalaciones lecheras en Hungría, curado de colados de concreto normal o pretensado en Islandia y Japón, provisión de calor y potencia en baja escala en plantas para la obtención de sal y una cervecería en Japón etc.

Por otro lado en Islandia se está llevando a cabo en la actualidad un proyecto para producir agua pesada utilizando la geotermia, lo que en caso de lograrse de una manera positiva ampliaría considerablemente sus horizontes.

Tal vez la utilización más extraordinaria de la geotermia, es la que está realizando el Instituto Atagawa, cercano a Tokio, Japón, en el cual mediante aguas termales que se bombean de 4 pozos, se calientan unos 4 000 m<sup>2</sup> de invernaderos, en los cuales se cultivan más de 5 400 especies de plantas tropicales, entre las que se cuentan árboles de mango, papaya, plátano y cacao, y en donde además se crían 450 cocodrilos.

Un caso curioso de la utilización de la energía geotérmica— (y a la vez muy inteligente), se dió cuando en Enero de 1973, una erupción volcánica destruyó un tercio de una ciudad en la isla de Vestmannaeyjar, en Islandia, con lo que al cubrir la lava una zona urbanizada, quedó bajo de ella parte de la red de tuberías del sistema municipal de distribución hidráulica, por lo que solo se necesitó circular agua a través de ella, para obtenerla caliente a la salida, con lo que se pudo disponer de un sistema público de calefacción, y adicionalmente utilizarse para el curado de concreto, con lo que la reconstrucción de la ciudad se aceleró.

Como pudo observarse de todo lo anterior, la diversidad de usos de la energía geotérmica de baja entalpía es enorme, ello sin tomar en cuenta un sinnúmero más de usos que hasta el momento no se han llevado a cabo y todos aquellos que se vayan a descubrir, conforme avancen las investigaciones en el campo.

De hecho, la capacidad de producción de energía geotérmica de baja temperatura, es de casi el doble de la de alta temperatura.

En la tabla II.4 se muestra la capacidad de energía geotérmica de baja temperatura en el mundo.

Sin embargo es importante señalar que casi el 70% de esos 8,532 MW<sub>e</sub> se utilizan para baños termales, por lo que puede verse - que todavía no se le ha dado la importancia que merece a los usos - de la energía geotérmica de baja temperatura, para otros fines que no sean los de baños termales.

Por lo que toca a los usos no energéticos de la energía geotérmica, estos también son muy diversos.

Actualmente se obtiene ácido bórico en Garderello, Italia; silicato de calcio en Wairakei, Nueva Zelanda; sulfato de sodio y de potasio en Cesano, Italia, además de cloruro de calcio y bicarbonato y sulfato de amonio; gas carbónico en el Valle Imperial en E.U.A.; -- cloruro de potasio en la provincia de Reykjanes en Islandia; y próximamente cloruro de potasio y de litio, además de cloruro de sodio como subproducto, en Cerro Prieto, México, estudiándose también la posibilidad de recuperar sales de calcio a futuro. En la tabla II.5 se muestra el estado actual en la recuperación de minerales de los fluidos geotérmicos.

TABLA II.4) CAPACIDAD INSTALADA DE ENERGIA GEOTERMICA DE BAJA TEMPERATURA.

(Más de 15° C y menos de 180° C)

<u>PAIS.</u>	<u>CAPACIDAD DE PRODUCCION.</u> ( MW. (C) ).
AUSTRIA	5
CHECOSLOVAQUIA	43
CHINA	151
E.U.A.	149
FRANCIA	56
HUNGRIA	1 166
ISLANDIA	1 141
ITALIA	265
JAPON	4 475
NUEVA ZELANDA	210
RUMANIA	36
U.R.S.S.	810
OTROS	25
	<hr/>
	8 532

Fuente: Informe del Grupo Técnico sobre Energía Geotérmica, O.N.U. (1980).

Tabla II.5) ESTADO ACTUAL EN LA RECUPERACION DE MINERALES DE LOS FLUIDOS GEOTERMICOS

LUGAR	PRODUCTOS RECUPERADOS/ RECUPERABLES	STATUS DEL SISTEMA	COMENTARIOS (REFERENCIAS)
Salton Sea California (salon magnesium y sodium)	Na Zn As Fe Mn	Laboratorio de experimentación a escala	* Precipitación como sulfatos * Oficina de minas de los E.U.A./M.I. interesados
Reynolds Island	NaCl KCl CaCl <sub>2</sub>	* Estudio económico de factibilidad * Medio en proceso de construcción	
San Juan California	Agua (domestica)	Planta piloto para 3 sistemas experimentales (distintos de los usados para empacar salinas) y un sistema de desalación	* Sistemas de desalación experimentales por lo que se han desarrollado en E.U.A. * Producción y consumo de CaCO <sub>3</sub> , BaSO <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub>
Wendover y Toiyabe	Mg SO <sub>4</sub>	Comercial? ?	Recuperado desde los 1700's
Valle Imperial (Imperial), California	CO <sub>2</sub>	Comercial	De pulpa con agua caliente de gas
Salton	CO <sub>2</sub>	Comercial	Para hacer hielo seco
Lerdo, Idaho	Mg SO <sub>4</sub> Mg Ca Na	Comercial	Desde los años 30
	Mg SO <sub>4</sub> Borax Ácido bórico (CO <sub>2</sub> ) Sulfato de CO <sub>2</sub> Borato de sodio Borato de litio	Comercial	* En 1940 se produjeron 10,000 toneladas de Borax * A partir de 1971, la producción de Borax aumentó considerablemente
Wairakei, Nueva Zelanda	As	Planta piloto	* Proceso de esta compañía se puede producir 200 toneladas
Wendover y Toiyabe Nueva Zelanda	SiO <sub>2</sub>	Una planta en proceso piloto	* Precipitación de CaSiO <sub>3</sub> * Precipitación por lixiviación * Purificación de SiO <sub>2</sub>
Curra Prieta, México	KCl	Planta piloto	* Base de KCl y NaCl de operación de minería recuperada por lixiviación

LUGAR	PRODUCTOS RECUPERADOS/ RECUPERABLES	STATUS DEL SISTEMA	COMENTARIOS (REFERENCIAS)
Islandia	Agua pesada	"Investigación"	* D de vapor * Comercio importante de ácidos en un proceso similar en su producción
Dammit, Omerout de Egipto	Na	Estudio de factibilidad	* Se cree puede ser aprovechable
El Tatio Chile	Li Ca Ba	Estudio de factibilidad	
	Mg SO <sub>4</sub> KCl	Terminado	
Salton Sea California	CO <sub>2</sub>	Se presume comercial	* Usado para refrigeración desde 1932 a 1954
	Otros minerales incluyendo KCl		* Efectos serios para desequilibrados en las SO <sub>4</sub>
Valle Imperial California	NaCl CaCl <sub>2</sub> KCl	Aparcamiento comercial	* Desde internacional 1964 - 67 * Inducen algunos volúmenes de evaporación * El 55% de los productos obtenidos fue
Valle Imperial California	NaCl KCl CaCl <sub>2</sub>	Planta piloto y estudio preliminar	* Investigación de la Unión D.I. * El producto preliminar será el KCl * Precipitación sucesiva (CaCl <sub>2</sub> , KCl, CaCl <sub>2</sub> ) * Uso evaporación y estudio 1965/67
Wairakei Nueva Zelanda	NaCl KCl LiCl		* Proceso de recuperación de sales * Precipitación de NaCl * Estudio 1965/67
	NaCl KCl LiCl Borax Ba Ca	Laboratorio y proceso de campo	* Muchos de los procesos de estudio han demostrado resultados, pero los detalles del método sobre los mecanismos de proceso
Valle Imperial California	Na Zn Li Fe Mn Al <sub>2</sub>	Planta piloto (actualmente desmantelada en Islandia)	* Investigación como alternativa * Oficina de minas de los E.U.A./Investigación sobre metales pesados

Fuente: Experience with minerals recovery from geothermal and other brines. (1982).

El autor, a manera de conclusión, considera que es todavía muy poco lo que se ha hecho en lo que respecta a los usos alternos-- de la geotermia, tanto en lo que respecta a baja entalpía, como a la obtención de minerales contenidos en las salmueras geotérmicas.

Es de esperarse, que debido a la cada vez mayor escasez de energéticos en todo el mundo, las investigaciones, proyectos y desarrollos en este campo aumenten de manera considerable en un futuro próximo.

Ojalá, la humanidad no dé la espalda a estos recursos, como a muchos otros, cuando ya no tenga alternativa, sino que sea previsor y los desarrolle antes de que se presente una nueva -- crisis energética.

Hasta el momento nunca ha sido así .....

No hay libro por malo que sea que no contenga algo bueno.

- Plinio -

## CAP. V) LA GEOTERMIA EN MEXICO.

### V.1) Antecedentes.

En un país en pleno desarrollo como es México, la importancia de la geotermia es inquestionable.

México es un país totalmente dependiente de los hidrocarburos para poder satisfacer sus necesidades de energía, pero debe tener se conciencia que estos se agotarán tarde o temprano, independiente-mente de la alta probabilidad de que en un futuro cercano se presente una nueva crisis energética, de ahí que el que escribe, considere de suma importancia que en los momentos actuales, en los que existe una baja en los precios de los hidrocarburos, estos se guarden para más adelante, cuando los precios seguramente volverán a subir, y probable-mente de manera estratosférica, ya que si las reservas disminuyen de-masiado, probablemente será necesario importarlos a futuro, y lo que es peor, esto tendría que ser a los precios que impusieran los países que todavía cuentan con reservas importantes de estos recursos.

Y que mejor manera de ahorrar hidrocarburos que produciendo electricidad o calor por medios distintos a ellos.

Es por ello que México debe poner especial énfasis en la diversificación de sus fuentes de energía, ya sea para producir electricidad o calor, una de las cuales es la geotermia.

La dependencia de México con respecto a los hidrocarburos es alarmante, máxime si se piensa que es más alta que en los países desarrollados, a pesar de que muchos de ellos al igual que México, cuentan con grandes reservas de hidrocarburos.

Esta dependencia alcanza la cifra del 91%, basada exclusivamente en el petróleo y el gas natural.

De esto se puede deducir que solo el 9% de las necesidades energéticas del país se satisfacen con otras fuentes, quedando el desglose de la siguiente manera: \*\*

- Hidroelectricidad	5%
- Carbón	2%
- Geotermia	2%

\*\* Estos porcentajes varían año con año, ya que dependen de diversos factores como los precios internacionales de los hidrocarburos; la precipitación pluvial de cada año, etc. Sin embargo en general el promedio se mantiene dentro de estos valores

Si se compara este 9% con el 34% mundial, se podrá observar lo peligroso, que en un momento dado, podría ser esta situación para México.

Por ello, si no se desarrolla una tecnología propia en el campo de las nuevas fuentes de energía, en el futuro se podría presentar la situación de no solo no contar con los hidrocarburos requeridos, (lo cual obligaría a importarlos), sino que por otra parte se dependería tecnológicamente de otros países que si desarrollaron a tiempo estas fuentes.

V.2) Evolución y Perspectivas.

Por desgracia México entró tarde al estudio de la geotermia, ya que los primeros estudios dentro de la materia se iniciaron a principios de los años cincuenta.

Fue el Ing. Luis F. De Anda el iniciador y propulsor de la geotermia en México, ya que tuvo la visión plena y certera del valor de los yacimientos geotérmicos, y de su aplicación en un sinnúmero de usos, siendo el principal la generación de electricidad. Ello a pesar de tener todas las opiniones en contra, debido a sus ideas acerca de las posibilidades de explotación del vapor endógeno.

Su interés por la materia empieza cuando en 1949, siendo cosejero técnico de la C.F.E. (de la cual fué co-fundador), realizó un viaje a Europa y decidió visitar el campo geotérmico de Larderello en Italia, lo cual lo convenció plenamente de las posibilidades de esta fuente, por lo que a partir de entonces se dedicó a dar conferencias en toda la República con el fin de conseguir el apoyo necesario para realizar los estudios tendientes a lograr su explotación.

No conforme con todo ello, en 1952 realizó un nuevo viaje a Larderello, esta vez con sus propios recursos, a fin de profundizar sus conocimientos. Sin embargo, no es sino hasta 1955, después de muchos años de continua insistencia, cuando se forma la Comisión de Energía Geotérmica, de la cual se le nombra presidente.

Esta comisión funcionaba por medio de un fideicomiso entre el Banco de México, Nacional Financiera y la Comisión Federal de Electricidad, y fue fundada el 2 de Mayo de 1955.

Para entonces colaboraban ya con el Ing. De Anda dos excelentes ingenieros geólogos, que fueron de las pocas personas que creyeron en las posibilidades de la geotermia y que participaron de manera muy importante en su desarrollo, ellos fueron el Ing. Jesús Ruiz Elizondo, recién llegado del Instituto Tecnológico de California donde había realizado estudios de geología estructural be ca do por el Banco de México, y el Ing. José Isita Septién, también becario del mismo. Personajes ambos, que no deben olvidarse al hablar de los inicios de la geotermia en México.

De un conjunto de aproximadamente 60 zonas ternaes, que en ese entonces se conocían, se escogieron tres que se consideraron con altas posibilidades, estas fueron la de Ixtlán de los Hervores y San Andrés (hoy Los Azufres) en Michoacán, y la de Pathé en el es ta do de Hidalgo, de las cuales se eligió esta última, iniciándose la perforación con un equipo de pulsata muy rudimentario, el 17 de Agosto de 1955, obteniéndose vapor el 14 de Enero de 1956.

De las aproximadamente 12 perforaciones que se realizaron en este campo, se obtuvo una mezcla de agua-vapor de baja entalpía que limitó las posibilidades de desarrollo del campo con fines comer cia les.

A pesar de ello, el 20 de Noviembre de 1959 se instaló en la zona la primera planta geotermoelectrica del país, que fue al mis mo ti em po la primera en el continente americano.

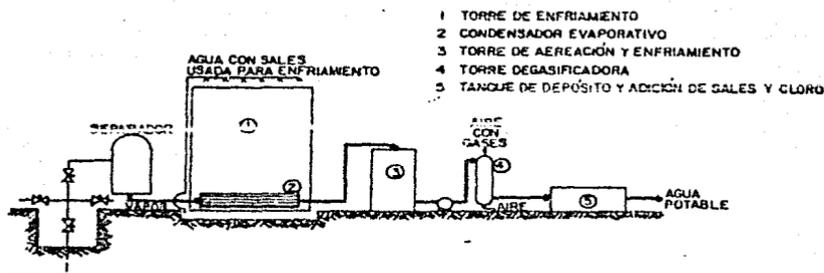
Si bien el campo geotérmico de Pathé no resultó económicamente competitivo en la producción de electricidad, sí fue todo un éxito dado que fue ahí donde se obtuvo por primera vez en México vapor endógeno a raíz de una perforación programada exclusivamente para ello.

Sin embargo sentó las bases para la creación de una infraestructura técnica y económica que más adelante permitiría el desarrollo de mejores proyectos geotérmicos.

A partir de 1962 se iniciaron los estudios en el campo de Cerro Prieto, en Mexicali, Baja California Norte, y en 1964 se perforaron los primeros pozos exploratorios, por lo que en base a las producciones tan altas de mezcla agua-vapor se pudo instalar en abril de 1973 dos unidades de 37.5 MW cada una. Este proyecto resultó ya todo un éxito desde el punto de vista técnico y económico y se convirtió en el primer proyecto geotérmico comercial en América Latina.

Resulta interesante mencionar que en ese mismo campo empezó a funcionar a partir de julio de 1979, la primera planta potabilizadora de agua a partir de vapor endógeno, en el mundo. Con la ventaja de que por otra parte todos sus elementos mecánicos estaban accionados exclusivamente por dicho vapor. Esta planta llegó a producir 140,000 lt/día, suficientes para abastecer a 400 personas. En la figura II.3 se muestra el esquema de funcionamiento de la misma.

FIGURA II.3) PLANTA POTABILIZADORA A PARTIR DEL VAPOR ENDOGENO.



Fuente: Enciclopedia de México. Tomo V. (1977).

Es precisamente a partir del campo de Cerro Prieto, que la geotermia empieza su desarrollo en gran escala en México, lo cual se debe en gran medida al esfuerzo y constancia mostrado por cientos de ingenieros mexicanos, y particularmente por el Ing. Geólogo (con estudios de especialización geotérmica en Iarderule, Italia; y Wairakei, Nueva Zelanda), Hector Alonso Espinosa, quien primero como coordinador de el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, y posteriormente como el primer gerente de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la C.F.E., llevaría a la geotermia mexicana a ocupar un lugar preponderante a nivel mundial.

De la figura II.2 (regiones geotérmicas del mundo), se deduce que las probabilidades de existencia de campos geotérmicos en México son muy grandes, ya que prácticamente todo su territorio se encuentra dentro de dichas regiones.

Las únicas zonas que quedan excluidas de dichas regiones son una parte de los estados de Tamaulipas, Campeche y Quintana Roo, y prácticamente la totalidad del estado de Yucatán.

En la figura II.4 se muestra la localización de las zonas termales de México, en donde se comprueba que efectivamente en los estados señalados anteriormente, la frecuencia de manifestaciones termales es muy pequeña.

Puede apreciarse que estas se concentran sobre todo en la zona noroeste del país (por donde corre la Falla de San Andrés), y en la zona central, particularmente en el Eje Neovolcánico.

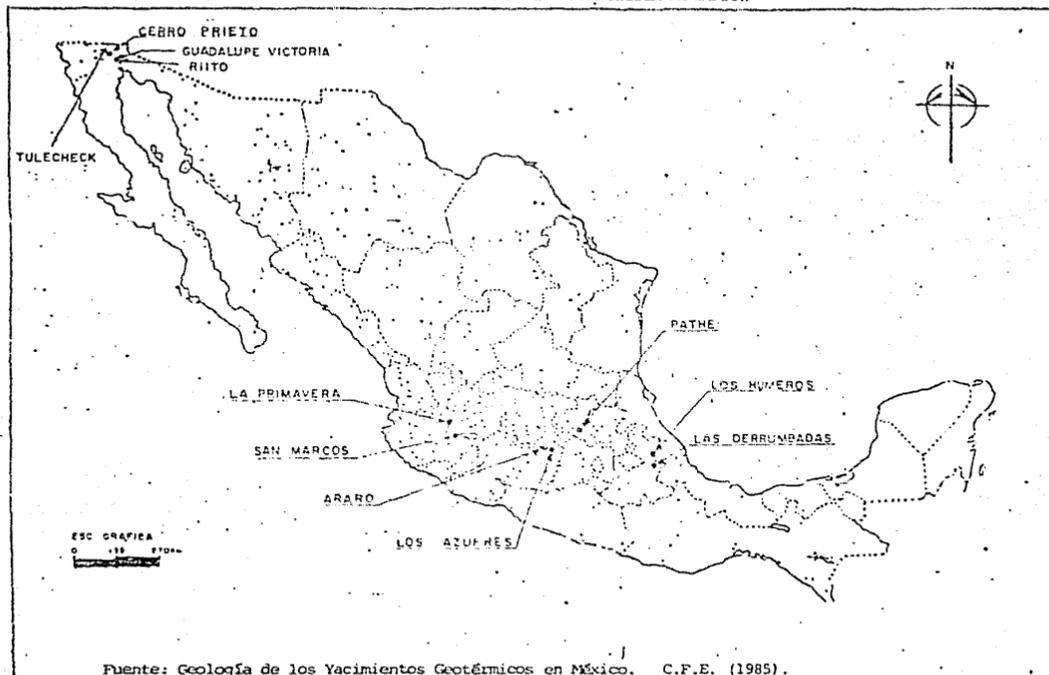
Esto, sin tomar en cuenta las zonas que faltan de detectarse, ya que la Comisión Federal de Electricidad tiene planeado -- terminar el censo de búsqueda de zonas termales hasta 1987.

De los estudios elaborados hasta ahora, y de una recopilación bibliográfica, se han podido identificar (a 1985), 1283 focos-termales en 28 estados de la república, en sus distintas modalidades de manantiales de agua caliente, fumarolas, volcanes de lodo, sulfataras, pozos de agua o una combinación de ellos, los cuales -- después de un reconocimiento geológico en 18 estados, se redujeron a 515 zonas geotérmicas, por considerarse que varias de ellas tienen un origen común.

Se estima que al terminar el censo de zonas termales, se habrán identificado por lo menos 30 zonas nuevas, lo que sumado a las 515 ya existentes, da un total de 545 probables zonas geotérmicas para 1987. En la figura II.5 se muestra el programa de reconocimiento de zonas termales en la República Mexicana.

Si se toma en cuenta que el 60% de los campos estudiados con geología y geoquímica de detalle son recomendables para realizar en ellos estudios geofísicos, se tiene que a futuro se tendrán cerca de 310 zonas geotérmicas con altas posibilidades de contener en su subsuelo un sistema geotérmico activo.

FIGURA II.4) LOCALIZACION DE ZONAS TERMALES DE LA REPUBLICA MEXICANA.



Fuente: Geología de los Yacimientos Geotérmicos en México. C.F.E. (1985).

FIGURA II.5) RECONOCIMIENTO DE ZONAS TERMALES EN LA REPUBLICA MEXICANA



Fuente: Geología de los Yacimientos Geotérmicos en México. C.F.E. (1985).

Siendo pesimistas y pensando que de esos 310 campos solo un 10% serán utilizables para producir electricidad, se tiene que -- podría haber más de 30 campos geotérmicos de alta entalpía en el -- país.

Si se supone que en promedio cada uno de esos campos tendría una capacidad de producción de 250 MW<sub>e</sub>, se tiene que la capacidad de producción de electricidad a través de la energía geotérmica convencional, a futuro, sería de cerca de 8,000 MW, lo cual es un -- poco mayor que las reservas catalogadas como posibles hasta el momento, y representa aproximadamente el 40% de la potencia instalada en el país (a noviembre de 1985) con las distintas fuentes energéticas.

Todo ello sin tomar en cuenta los posibles nuevos descubrimientos, las mejoras en la eficiencia de utilización, y la probabilidad de que la proporción de campos de alta entalpía sea mayor a la supuesta aquí.

Además, si se utiliza de una manera más amplia la energía de alta entalpía, la contribución de la geotermia podría ser aun mayor.

En la tabla II.6 se muestra la relación de focos termales por estados de la República Mexicana, y en la tabla II.7 se muestra -- tra la potencia instalada en México, a 1985.

TABLA. II-6) RELACION DE FOCOS TERMALES POR ESTADOS DE LA REPUBLICA MEXICANA.  
(1985)

ESTADO	TIPO DE FOCO				TOTAL FOCOS	ZONAS GEOTERMICAS
	MANANTIAL	POZO	FUMARDLA	VOCAN DE LODO		
Aguascalientes.	----	47	----	----	47	7
Baja California Norte.	18	1	1	1	21	20
Baja California Sur.	7	3	4	----	14	9
Coahuila.	10	2	----	----	12	12
Colima.	4	----	----	----	4	4
Chiapas.	2	----	2	----	4	6
Chihuahua.	30	12	----	----	42	37
Durango.	17	----	----	----	17	17
Guanajuato.	38	147	----	----	185	31
Guerrero.	6	----	----	----	6	6
Hidalgo.	11	28	----	----	39	13
Jalisco.	217	88	13	6	324	104
México.	5	1	----	----	6	6
Michoacán.	62	13	7	2	84	48
Morelos.	7	13	----	----	20	7
Nayarit.	23	----	----	----	23	23
Nuevo León.	5	----	----	----	5	5
Oaxaca.	5	----	----	----	5	5
Puebla.	11	----	8	----	19	10
Queretaro.	6	167	----	----	173	9
San Luis Potosí.	7	66	----	----	73	19
Sinaloa.	36	1	----	----	39	32
Sonora.	44	36	----	----	80	53
Tabasco.	2	----	----	----	2	2
Tamaulipas.	2	----	----	----	2	2
Tlaxcala.	1	----	----	----	1	1
Veracruz.	9	----	----	----	9	9
Zacatecas.	14	13	----	----	27	18
<b>T o t a l e s</b> .....	<b>601</b>	<b>638</b>	<b>35</b>	<b>9</b>	<b>1283</b>	<b>515</b>

Fuente: Geología de los Yacimientos Geotérmicos en México, Comisión Federal de Electricidad. (1985).

Puede verse que la mayor concentración de focos ternaes-- se encuentra en los estados de Jalisco, Guanajuato, Querétaro, Michoacán y Sonora respectivamente, mientras que la mayor concentración de zonas geotérmicas (que son realmente las importantes), se encuentra en los estados de Jalisco, Sonora, Michoacán, Chihuahua y Sinaloa.

Ello muestra que, como era de esperarse, existe una estrecha relación entre los focos ternaes y las zonas geotérmicas.

Además permite ratificar que la potencialidad geotérmica de México es muy grande, esto sin contar que todavía falta por censar cerca de un 30% de la superficie del territorio.

Por otra parte, sería conveniente que, sin suspender los estudios en las zonas que todavía no se han censado, se le diera prioridad y mayor importancia a las zonas que hasta el momento ya han demostrado su potencialidad.

No hay que olvidar que existen algunos estados poco estudiados y que podrían tener un potencial insospechado, como sería el caso de Chiapas y Chihuahua, por lo que es incuestionable, que se debe continuar con los censos, para poder determinar de una manera veraz todas las manifestaciones ternaes del país.

TABLA II.7) POTENCIA INSTALADA EN MEXICO.  
(1985)

<u>TIPO DE PLANTA</u>	<u>CAPACIDAD INSTALADA</u> (Mw)	(%)
TERMOELECTRICA	9 599	45.65
TURBOGAS	1 789 <sup>(a)</sup>	8.50
CICLO COMBINADO	1 450	6.89
COMBUSTION INTERNA	112 <sup>(b)</sup>	0.53
CARBOELECTRICA	900	4.28
GEOTERMoeLECTRICA	645	3.06
HIDROELECTRICA	6 532	31.06
T O T A L	21 027	100.00

(a) Incluye 17 MW de unidades móviles.

(b) Incluye 39 MW de unidades de emergencia.

Fuente: CFE, Informe de Operación de 1985. (1986).

De la determinación de los focos termales se ha podido observar que existen ciertas regiones que presentan características -- geológicas similares, por lo que se ha decidido dividir al país en -- provincias geotérmicas, que podrían facilitar la exploración. Es-- tas provincias son las siguientes:

- 1.- Provincia geotérmica de la Faja Volcánica Mexicana.
- 2.- Provincia geotérmica de la Sierra Madre Occidental.
- 3.- Provincia geotérmica del sistema de San Andrés, y -- Sierras de Sonora y Sinaloa.
- 4.- Provincia geotérmica de Baja California.
- 5.- Provincia geotérmica de la Sierra Madre Oriental.
- 6.- Provincia geotérmica de la Mesa Central.
- 7.- Provincia geotérmica de la Sierra Madre del Sur.

En la figura II.6 se muestran las provincias geotérmicas -- de la República Mexicana\*\*.

Por otra parte, la cuantificación de los focos termales ha permitido estimar las reservas geotérmicas del país, las cuales se -- dividen en probadas, probables y posibles.

- Probadas: Son las que a raíz de los estudios y pruebas realiza-- das en los pozos, permiten asegurar la instalación de una planta con una potencia dada, con una operación continua mínima de 30 años.

\*\* La división de la República Mexicana en provincias geotérmicas -- no está todavía plenamente aceptada por la totalidad de estudiosos -- del tema.



- Probables: Son aquellas zonas en las que mediante estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos, se ha podido cuantificar de una manera aproximada, la extensión, volumen y energía almacenada en el probable yacimiento.
- Posibles: Son las que se pueden estimar, en base al análisis de las manifestaciones termales existentes y ya localizadas, y a otras anomalías térmicas.

A continuación se presenta el desglose por cada tipo de reserva, mostrando el potencial geotérmico de las mismas en MW.

Reservas Probadas:

- Cerro Prieto, B.C.	1,000
- Los Azufres, Mich.	165
- Los Hornos, Pue.	<u>55</u>
T O T A L	1 220 MW.

Reservas Probables:

- Cerro Prieto, B.C.	300
- Los Azufres, Mich.	500
- Los Hornos, Pue.	700
- La Primavera, Jal.	150
- Valle de Mexicali-Laguna Salada en B.C.	150
- San Agustín, Mich.	250
- Araró, Mich.	250

- Probables: Son aquellas zonas en las que mediante estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos, se ha podido cuantificar de una manera aproximada, la extensión, volumen y energía almacenada en el probable yacimiento.
- Posibles: Son las que se pueden estimar, en base al análisis de las manifestaciones termales existentes y ya localizadas, y a otras anomalías térmicas.

A continuación se presenta el desglose por cada tipo de reserva, mostrando el potencial geotérmico de las mismas en MW.

#### Reservas Probadas:

- Cerro Prieto, B.C.	1,000
- Los Azufres, Mich.	165
- Los Hornos, Pue.	<u>55</u>
T O T A L	1 220 MW.

#### Reservas Probables:

- Cerro Prieto, B.C.	300
- Los Azufres, Mich.	500
- Los Hornos, Pue.	700
- La Primavera, Jal.	150
- Valle de Mexicali-Laguna Salada en B.C.	150
- San Agustín, Mich.	250
- Araró, Mich.	250

- San Bartolomé de los Baños, Gto.	500
- Ixtlán de los Hervores, Mich.	100
- Taxhido, Hgo.	250
- Los Negritos, Mich.	150
- Volcán Ceboruco, Nay.	150
- La Soledad, Jal.	150
- Volcán Tacaná, Chis.	150
- Las Tres Vírgenes, B.C.S.	100
- Otros	<u>950</u>
T O T A L	4 800 MW.

#### Reservas Posibles:

En base a los 1283 focos termales detectados hasta la fecha se estima que se podrán generar otros 7,000 MW.\*\*

Por lo que resumiendo se tiene:

Reservas Probadas	1,220 MW.
Reservas Probadas	4,800 MW.
Reservas Posibles	<u>7,000 MW.</u>
T O T A L	13,029 MW.

\*\* Como puede verse en estimaciones hechas por el autor hojas atrás, en base a probabilidades, se estimó que la potencialidad geotérmica de México andaría del orden de 9,000 MW, cifra poco mayor que los 7,000 MW, estimados por la C.F.E. como reservas posibles.

En la actualidad en México existe una capacidad instalada de 645 MW<sub>e</sub>, que sobre un total mundial de 4,762 MW<sub>e</sub>, corresponde al 13.54% del total, y lo coloca a su vez en el tercer lugar mundial en capacidad instalada.

El desglose es el siguiente:

- 150 MW en Cerro Prieto I, Baja California, en 4 unidades de 37.5-MW c/u.
- 30 MW en el mismo Cerro Prieto I, en una unidad de baja presión-- que aprovecha el agua separada que anteriormente se tiraba a la laguna de evaporación, y que proviene de los pozos de Cerro Prieto I.
- 220 MW en Cerro Prieto II, con 2 unidades de 110 MW c/u.
- 220 MW en Cerro Prieto III, con 2 unidades de 110 MW c/u.
- 25 MW en Los Azufres, Michoacán, con 5 unidades a boca de pozo-- de 5 MW c/u.

Esta capacidad deberá crecer aún más, ya que según el Plan Maestro de Desarrollo Geotérmico de la C.F.E., se tiene planeado tener una capacidad instalada de 1355 MW para 1994, lo cual colocaría a México en el segundo lugar mundial, solo atrás de los Estados Unidos de América que ocuparán el primer lugar; esta situación, según esos mismos planes, deberá mantenerse hasta por lo menos el año 2000, con una capacidad instalada para entonces de 2100 a 2400 MW.

Lo cual, a pesar de todo, queda muy por debajo de los ---- 4,000 MW que en los principios de los años 80 se tenían planeados para el año 2000.

Cabe aclarar que si no se llega a esos 4,000 MW no será -- por falta de capacidad técnica ni humana, sino de recursos económicos, ya que en la actualidad (y no se espera que varíe mucho esta situación en un futuro próximo), los recortes presupuestales en materia geotérmica son agobiantes. Esto constituye una clara contradicción con el Plan Nacional de Energía del país, el cual pretende aumentar los estudios y planes en lo que a diversificación de las -- fuentes de energía se refiere.

Por ello es importante insistir en este desarrollo, y no retrasarlo con recortes presupuestales, a pesar de que la situación del país no sea, en estos momentos, precisamente la mejor.

A continuación se muestran los planes de instalación de -- centrales y turbogeneradores geotérmicos, que la Comisión Federal de Electricidad tiene contemplados para los próximos 8 años.

El calendario de entrada en operación es el siguiente:

- Azufres, 7 unidades móviles de 5 MW c/u., para un total de 35 MW, entrando 2 en julio de 1987, las cuales contarán con integración nacional, apoyando en esto el IIE, y 5 en enero de 1988.
- Tejamaniles, en el campo geotérmico de los Azufres, Michoacán, -- con una unidad de 50 MW, para julio de 1988.
- Los Hornos, Puebla, 3 unidades móviles de 5 MW c/u. para un total de 15 MW, para octubre de 1988.
- La Primavera, Jalisco, 2 unidades móviles de 5 MW c/u., para un total de 10 MW, la primera para junio de 1989 y la segunda para septiembre de 1989.
- Cerro Prieto IV U-1, en Baja California Norte, con una unidad de 55 MW, para febrero de 1991.
- Los Azufres I U-1, con una unidad de 55 MW, para marzo de 1991.
- Los Azufres I U-2, con una unidad de 55 MW, para septiembre de 1991.
- Cerro Prieto IV U-2, con una unidad de 55 MW, para febrero de 1992.

- Los azufres II U-1, con una unidad de 55 MW. para Marzo de 1993.
- Los azufres II U-2, con una unidad de 55 MW., para Junio de 1993.
- Cerro Prieto IV U-3, con una unidad de 55 MW., para Junio de 1993.
- Cerro Prieto IV U-4. con una unidad de 55 MW., para Diciembre de 1993.
- Los humeros U-1, con una unidad de 55 MW., para Marzo de 1994.
- Los Humeros U-2, con una unidad de 55 MW., para Octubre de 1994.
- Los Azufres, con 10 unidades móviles de 5 MW. c/u., para un total de 50 MW., para Diciembre de 1994.

Lo anterior da una suma de 710 MW., lo cual sumado a los 645 MW. ya instalados, da por resultado los 1355 MW. antes señalados.

Como puede verse, a pesar de los recortes presupuestales, se está duplicando la capacidad geotérmica instalada en el país, en tan solo 9 años.

Esto sin mencionar la posibilidad que existe, de otras 10 unidades móviles de 5 MW. c/u. a boca de pozo, con un total de 50 MW. en los campos que se estén explorando en esos momentos (aproximadamente por 1994], lo cual aumentaría la capacidad instalada a 1405 MW.

De lo anterior se puede ver que los planes de la C.F.E. - en materia geotérmica son bastantes ambiciosos, de hecho, se encuentran entre los más ambiciosos del mundo.

Resulta interesante señalar, que en México se encuentra el campo geotérmico más grande del mundo (geológicamente hablando), -- que es el de Cerro Prieto en Baja California Norte, con una capacidad instalada hasta el momento de 620 MW, en 9 unidades, la cual se verá incrementada con las nuevas unidades que se le añadirán, llegando para 1992 a 840 MW en 13 unidades.

Por otra parte, el campo geotérmico de Cerro Prieto cuenta también con unidades de producción de entre las más grandes del mundo (110 MW), siendo éstas superadas únicamente por las unidades de 135, 120 y 114 MW, todas ellas instaladas en el campo de los --- Geysers en E.U.A.

\*\* Es importante hacer la aclaración de que al campo de los Geysers se le ha considerado erróneamente como el más grande del mundo, lo cual no es totalmente cierto, ya que en realidad no se trata de un solo campo geológico (estructuralmente hablando), sino de varios campos muy cercanos entre sí, y con comportamientos individuales.

V.3) Importancia (Ventajas y Desventajas).

Es indudable que la geotermia representa un papel importante en México, y que este será cada vez mayor conforme pase el tiempo, si bien no en valor relativo (ya que es difícil que la geotermia pueda llegar a representar más del 4 o 5% de la oferta total de energía eléctrica), si en valor absoluto, ya que conforme ésta oferta total aumenta, ese 4 o 5% representará una cantidad cada vez mayor de MW<sub>e</sub> instalados.

En general la geotermia presenta muchas ventajas con respecto a las fuentes tradicionales de energía, éstas son:

- a) Gran Potencialidad a Futuro: Ya que independientemente de la gran posibilidad de existencia de más campos geotérmicos de los detectados hasta el momento, existe también la gran potencialidad de las rocas secas y calientes, las masas de magma, y las zonas geoprasurizadas, que hasta ahora no se explotan comercialmente debido principalmente a los altos costos y a la insuficiencia tecnológica. Por ello puede decirse que la geotermia todavía tiene un largo camino que recorrer, además de una potencialidad a futuro insospechable por el momento.
- b) Gran Diversidad de Usos: La geotermia tiene una infinidad de usos diferentes a su utilización clásica, consistente en la producción de electricidad. Estos usos son tan numerosos que todavía no se han clasificado totalmente, independientemente de que es mucho lo que falta por investigarse al respecto.

Sobre este respecto, el autor considera que se está cometiendo un error con respecto a los usos del vapor endógeno, ya que hasta ahora se le utiliza básicamente en la producción de electricidad (es decir, solo se está utilizando, a gran escala, el vapor de alta entalpia o temperatura), siendo que existe una potencialidad insospechada en el uso del vapor geotérmico de mediana y baja entalpia, lo cual no solo estriba en la gran diversidad de usos anteriormente manifestados, sino también en la posibilidad de utilizarlos en la co generación.

d) Fuente renovable de energía: Este es un punto que se discute todavía mucho en la actualidad, ya que hasta el momento no se ha probado por completo la renovabilidad de esta fuente.

La experiencia parece mostrar que si puede considerarse a la geotermia como una fuente renovable de energía, siempre y cuando la explotación del campo se realice de manera racional, entendiéndose por racional el que no se obtenga más fluido del que se genera (por causas naturales o por reinyección), esto es, la explotación no debe ser mayor que la recarga hidráulica del yacimiento. Para lograr esto se conocen dos procedimientos, el primero de ellos consiste en realizar una explotación controlada, tratando de que esta no sea mayor que la recarga hidráulica natural; este procedimiento presenta la desventaja de que se depende totalmente de la mencionada recarga, la cual se puede dar de una manera bastante lenta, por lo que la explotación se ve reducida en capacidad. El segundo procedimiento -- consiste en utilizar una recarga que puede llamarse artificial, consistente en la reinyección de la salmuera de desecho, que se agrega a la recarga hidráulica natural, y permite una explotación mayor.

Habiéndose conseguido establecer un equilibrio entre la re carga natural y artificial del yacimiento, y la descarga (que se extrae a través de los pozos), el sistema geotérmico puede considerarse infinito para todo efecto práctico, y por tanto, auto-renovable.

Ciertamente la emisión de calor de la fuente no es infinita, y tarde o temprano la cantidad de energía calorífica emitida será in capaz de calentar el agua de la recarga, abatiéndose las temperatu ras del sistema. Todo indica, sin embargo, que este es un proceso que generalmente toma de miles a centenares de años (y hasta millones de años según ciertos cálculos).

Podría ocurrir también que aunque se consiguiera recargar un volumen equivalente al que se extrae, la roca no poseyera la sufi ciente conductividad térmica para ceder calor al fluido al ritmo ade cuado para no abatir las temperaturas; no obstante, las conductivida des típicas de las rocas volcánicas, -y aún las de las rocas sedimen tarias- permiten establecer que a menos de que se tratara de un yaci miento geotérmico extremadamente reducido, sometido a un fuerte ritmo de extracción, no hay mayor dificultad en alcanzar el equilibrio-hidráulico y térmico, si se conocen a fondo las características del yacimiento.

Los argumentos en pro y en contra de la renovabilidad de esta fuente resultan controversiales por el momento. En Larderello, Italia, por ejemplo, el cambio más significativo ha sido que al principio se obtenía vapor saturado, mientras que actualmente lo que se obtiene es básicamente vapor seco con cantidades apreciables de vapor sobrecalentado, a cambio de ello el flujo de calor en muchas de las áreas de actividad geotérmica natural intensa ha casi desaparecido, sin embargo no se tienen detectadas caídas importantes de presión. La vida promedio de los pozos en este campo se ha estimado en 20 años, aunque algunos de ellos todavía siguen produciendo después de 30 años con una potencia considerablemente menor.\*\*\*

Por otro lado, en Wairakei, Nueva Zelanda, se han producido cambios substanciales en el subsuelo, desde que el campo empezó a funcionar comercialmente en 1958. Se ha detectado una caída casi uniforme de presión de más de 21 kg/cm<sup>2</sup>, pero no se ha registrado disminución en el flujo de calor, por otra parte, la entalpía en la descarga de los pozos ha aumentado considerablemente. La vida promedio de los pozos en Wairakei es difícil de estimar, del total de 68 pozos de producción que han sido usados, 7 han sido abandonados, 2 debido al rompimiento de la tubería de revestimiento, y 5 debido a pérdidas de presión muy grandes. El promedio de uso de los 7 pozos abandonados fue de 9.5 años, mientras que el de los 61 restantes es de 13 años, y de estos 4 han estado produciendo por más de 19 años.\*\*\*\*

- \*\* BOLTON, R.S.  
Management of a Geothermal Field.  
(Tomado de ARMSTEAD, H.C.H.: Geothermal Energy-Review of Research and Development, Paris: UNESCO, 1973).
- \*\*\* Algunos de los defensores de la teoría de la renovabilidad de la energía geotérmica, sostienen que lo que se agotan son los pozos, por lo que hay que substituirlos, pero no el yacimiento.
- \*\*\*\* Op. cit. pag. 179.
- \*\*\*\*\* Op. cit. pag. 178.

d) Ahorro Económico y de Combustibles: Tal vez sea este uno de los puntos que le da mayor validez a la utilización de la energía geotérmica, ya que en cualquier sociedad uno de los parámetros más importantes es el económico, de ahí la gran importancia que tiene dicho parámetro en la justificación o no del uso de una planta geotermoelectrica, en lugar de cualquier otra.

El estudio realizado por el Departamento de Estudios Económicos de Producción e Inversión, de la Gerencia de Estudios de la -- CFE, da los siguientes datos a julio de 1986.

La planta geotermoelectrica de Cerro Prieto de 1973 a 1985 generó 11,041 GWh, lo que ha permitido un ahorro de 17'779,674 barriles equivalentes de combustóleo, representando esto un ahorro económico de 240'025,599 dólares. Por otra parte en el campo de Los Azules se generaron de 1982 a 1985, 482 GWh, con un ahorro en combustibles de 776'179 barriles equivalentes de combustóleo, y un ahorro -- económico de 10'478,417 dólares. Lo cual representa una producción total de 11,523 GWh, con un ahorro de 18'555,853 barriles de combustóleo, y un ahorro económico de 250'504,016 dólares, como puede observarse, tanto el ahorro en combustibles, como el ahorro económico, son nada despreciables, además de que el ahorro de combustibles permite la utilización de los mismos para otros usos más importantes -- que el quemarlos, como la producción de plásticos entre otros. Para la realización del cálculo anterior se supuso un precio promedio de 13.50 dólares por barril, correspondiente a una estimación media para 1986, realizada por el departamento encargado del estudio.

e) Bajo Costo del kWh Producido: Esta es otra de las grandes ventajas de la geotermia sobre otras fuentes de energía, ya que a lo largo del tiempo se ha ido confirmando que el costo del kWh producido en plantas geotérmicas está entre los más bajos, pudiendo ser el más bajo, dependiendo de los precios internacionales del petróleo.

Por ello resulta sumamente importante no perder nunca de vista dichos precios, ya que la competitividad de una planta geotérmica eléctrica dependerá en gran medida de los mismos.

Esto pudo comprobarse históricamente, cuando a raíz de la crisis petrolera de 1973 primero y 1979 después, la competitividad de las plantas geotérmicas sufrió un notable incremento; y más recientemente con la drástica caída de los precios del petróleo, que ha afectado de manera notoria dicha competitividad, al grado que de seguir descendiendo los precios, las plantas geotérmicas podrían dejar de ser competitivas, pudiendo ser mejor producir electricidad con alguna otra fuente.

Un factor fundamental para que el costo del kWh producido en plantas geotermoeléctricas sea bajo, es que el costo del combustible es nulo, aunque hay que mencionar que en algunos países, como los Estados Unidos, si se le asigna un valor al precio del combustible (que para el caso es el vapor), debido a que la compañía que explora y perfora, le vende el vapor obtenido a otra compañía, que se encarga de la producción, distribución y comercialización de la energía eléctrica.

En la tabla II.8 aparecen los costos estimados de generación eléctrica para plantas nuevas en pesos por kWh, y en la tabla II.9 el costo unitario de generación según distintas tecnologías.

\*\* Cálculos recientes (1986) indican que el costo del kWh geotérmico sería igual al de una termoeléctrica, si el precio del petróleo se mantuviera por los próximos 20 años en 13 dólares por barril.

TABLE II. 8) Costos estimados de generación eléctrica para nuevas plantas (pesos por KWh)\*

	Geo- térmica	Carbo- eléctrica	Hidro- eléctrica	Nucleo- eléctrica	Termo- eléctrica a base de combustóleo
Total	0.37	0.47	0.48	0.52	0.69
Costo de inversión	0.25	0.18	0.44	0.32	0.12
Costo de explotación	0.12	0.07	0.04	0.05	0.04
<u>Costo de combustible**</u>	—	0.22	—	0.15	0.53

\* Precios de 1979

\*\* Comparación con base en precios internacionales de los combustibles

Secretaría de Planeación y Fomento Industrial

Los costos unitarios totales se calcularon con base en cifras a precios de 1979 considerando el valor de los combustibles en el mercado internacional. Para las estimaciones se seleccionaron las plantas más representativas por fuente energética primaria. Puede observarse que en los casos de la generación geotérmica, hidráulica y nuclear, el costo de inversión tiene el mayor peso relativo, mientras que en las termoelectricas a base de carbón y de hidrocarburos predomina el de los combustibles. Sumando los distintos componentes, la fuente más económica es la geotérmica y la más costosa, la generación a partir de combustóleo. No hay gran diferencia en el caso de las tres fuentes restantes. Debido al alto valor de los hidrocarburos en el mercado internacional y a los usos alternativos que éstos tienen, conviene disminuir su participación en la generación eléctrica. En el futuro, a medida que su precio se eleve en términos reales, resultará cada vez menos atractivo para la economía utilizarlos para este propósito.

TABLA II.9) COSTO UNITARIO DE GENERACION SEGUN DISTINTAS TECNOLOGIAS.<sup>(a)</sup>

TIPO DE CENTRAL	COSTO DEL KW/HR EN PESOS			TOTAL
	INVERSION <sup>(b)</sup>	COMBUSTIBLE	OPERACION Y MANTENIMIENTO	
<b>TERMOELECTRICA</b>				
2 X 350 MW	2.08	6.39	0.15	9.62
2 X 160 MW	2.52	6.64	0.26	9.42
2 X 84 MW	2.96	6.86	0.39	10.21
2 X 37.5 MW	3.47	7.15	0.67	11.29
<b>TURBOGAS</b>				
GAS (1 X 30 MW)	5.44	11.51	1.31	18.26
DIESEL (1 X 30 MW)	5.59	14.87	1.31	21.77
<b>CICLO COMBINADO</b>				
GAS (1 X 250 MW)	2.34	7.48	0.17	9.99
DIESEL (1 X 250 MW)	2.38	9.48	0.17	12.03
<b>DIESEL (1 X 30 MW)</b>				
DIESEL (1 X 30 MW)	3.97	6.38	0.68	11.03
<b>CARBOELECTRICA (2 X 350 MW)</b>				
CARBOELECTRICA (2 X 350 MW)	3.21	2.95	0.28	6.44
<b>NUCLEOELECTRICA (2 X 1000 MW)</b>				
NUCLEOELECTRICA (2 X 1000 MW)	5.53	1.05	0.81	7.39

(a) Costo del Kw<sub>h</sub> neto Generado.

(b) A partir del costo unitario directo más indirecto.

TABLA II.9).....(continuación)

TIPO DE CENTRAL	INVERSION.	COMBUSTIBLE	OPERACION Y MANTENIMIENTO	TOTAL
<b>HIDROELECTRICA</b>				
CHICOASEN (5 X 300 MW)	6.45	---	0.06	6.51
EL CARACOL (3 X 198 MW)	11.63	---	0.15	11.78
PENITAS (4 X 105 MW)	6.46	---	0.19	6.65
COMEDERO (2 X 55 MW)	5.05	---	0.66	5.71
BACURAO (2 X 46 MW)	5.44	---	0.84	6.28
AMISTAL <sup>(c)</sup> (2 X 33 MW)	3.84	---	1.59	5.43
<b>GEOTERMoeLECTRICA<sup>(d)</sup></b>				
CERRO PRIETO (2 X 110 MW)	3.96	---	1.52	5.48
LOS AZUFRES (5 X 5 MW) <sup>(e)</sup>	5.11	---	1.70	6.81
UNIDAD MOVIL (1 X 5 MW)	4.69	---	0.94	5.63

(c) El costo de inversión en esta central fue menor al normal, debido a que la CFE no tuvo que construir la presa, sino que aprovechó una ya existente en el lugar, y que había sido construida por la SARH para realizar obras de riego.

(d) En las centrales geotermoelectricas no se considera el costo del vapor como combustible ya que los costos del campo geotérmico están incluidos en los costos de inversión y de operación y mantenimiento.

(e) Este dato no aparece en la fuente original, sino que fue tomado de la conferencia denominada "Recursos Geotérmicos en la Primavera, Jal.", del Ing. Hector Alonso Espinosa, Gerente de Proyectos Geotermoelectricos de la CFE.

Fuente: Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico. CFE., (1984).

f) Poco Contaminante: Otro factor más a favor de la geotermia es el hecho de haber demostrado a lo largo de los años, ser una fuente de energía poco contaminante, sobre todo si se le compara con las fuentes tradicionales como las termoeléctricas; carboceléctricas; y nucleoceléctricas, al grado de que, con estas últimas no ha podido de terminarse hasta el momento, de manera satisfactoria, el uso y disposición que habrá de darse a los desechos radiactivos.

Los principales tipos de contaminación geotérmica son: La atmosférica, debido a la salida de gases, las cuales generalmente no suelen ser muy altas; la térmica, debido a las aguas de desecho, que en ciertos casos como cuando se tiran a ríos o arroyos pueden representar un problema serio; y la química debido a la existencia de sales disueltas en las aguas de desecho, que puede ser tan seria que se necesiten tomar medidas drásticas, como insignificante debido a los bajos contenidos de sales en algunos campos geotérmicos, como el de Wairakei, en el que las aguas de desecho se descargan a un gran río cercano.\*\* La contaminación química suele ser generalmente un problema menor en los campos de vapor dominante.

En la tabla II.10 se muestra la contaminación al medio ambiente de la geotermia en comparación con otras fuentes de energía.

\*\* BOLTON, R.S.  
Management of a Geothermal Field.  
(Tomado de ARMSTEAD, H.C.H.; Geothermal Energy-Review of Research and Development, París: UNESCO, 1973).

TABLA II.10) IMPACTO AL MEDIO AMBIENTE DE DIVERSAS FUENTES DE ENERGÍA.

RECURSO O TIPO DE ENERGÍA	RECURSO AIRE	RECURSO AGUA	RECURSO SUELO
<u>NO RENOVABLE</u>			
<u>PETROLIO</u>			
- Exploración	1	2	3
- Explotación	5	5	5
- Uso	5	3	2
<u>GAS</u>			
- Exploración	1	2	2
- Explotación	4 (CO <sub>2</sub> contaminante)	1	2 (cuberfas)
- Uso	2	1	1
<u>CARBÓN</u>			
- Exploración	1	1	2
- Explotación	3	2	4 (excavaciones)
- Uso	5	3 (agua enfriamiento)	2
<u>URANIO</u>			
- Exploración	1	1	2
- Explotación	2	2	3 (activación)
- Uso	2	5 (contaminación química)	3 (excavaciones)
<u>RENOVABLES</u>			
<u>GEOTERMIA</u>			
- Exploración	1	1	2
- Explotación	1	4 (sales)	3 (regulación)
- Uso	1	3 (ruido) baja	1
<u>HIDROELECTRICAS</u>	1	2	4 (impactos, 11 años)
<u>LEÑA Y CARBÓN VEGETAL</u>	4	1	4 (uso de pesticidas)
<u>BIOMASA</u>	2 (biodigestores)	1	1 (ruido)
<u>RESIDUOS SÓLIDOS</u>	4	1	2
<u>ENERGÍA SOLAR</u>	1	1	1
<u>ENERGÍA EÓLICA</u>	1	1	3 (ruido, 60-70 decibelios)
<u>ENERGÍA OCEÁNICA (OTEC)</u>	1	1	1
<u>ENERGÍA HIDROMOTRIZ</u>	1	1	2

Fuente: Apuntes de la Materia Energía y Medio Ambiente, CENPL-URAM. (1985).

TABLA I.10)..... (Continuación).

ESCALA:

- 1 - NADA
- 2 - POCO
- 3 - REGULAR
- 4 - ALTO
- 5 - BASTANTE

## RESUMIENDO SE TIENE:

Fuentes No Renovables.

PETROLEO  
GAS  
CARBON  
URANIO

Contaminación.

31  
16  
23  
21

Fuentes Renovables.

GEOTERMIA  
HIDROELECTRICAS  
LEÑA Y CARBON VEGETAL  
BIOGASA  
DESECHOS SOLIDOS  
ENERGIA SOLAR  
ENERGIA EOLICA  
ENERGIA OCEANICA (OTEC)  
ENERGIA MAREMOTRIZ #

17  
07  
09  
04  
07  
03  
05  
03  
04

g) Alto factor de planta: Las plantas geotérmicas tienen el factor de planta más alto de todos los tipos de planta existentes hasta el momento, el cual oscila entre el 80 e incluso el 90%, y las pone -- muy por encima de las demás, a todo esto contribuye en una gran manera la ausencia de calderas, las cuales como se mencionó anteriormente suelen ocasionar muchos problemas, que se reflejan a su vez-- en una baja del factor de planta.

Para entender un poco mejor esto, es necesario ver que el factor de planta está dado por la siguiente ecuación:

$$F.P. = \frac{\text{número de KWH generados en un año}}{\text{Número de KWH que podrían generarse a plena carga.}}$$

De donde puede verse que entre más se aproxime el numerador al denominador, mayor será el factor de planta, de ahí que al -- casi no presentarse paros en la planta, el número de KWH generados-- puede aproximarse bastante al número de KWH que se podrían generar-- a plena carga, por lo que el factor de planta resulta bastante alto.

En la tabla II.11 se muestran los factores de planta y aficiencias de los diversos tipos de planta.

TABLA II.11) FACTORES DE PLANTA Y EFICIENCIAS DE DIVERSOS TIPOS DE PLANTA.

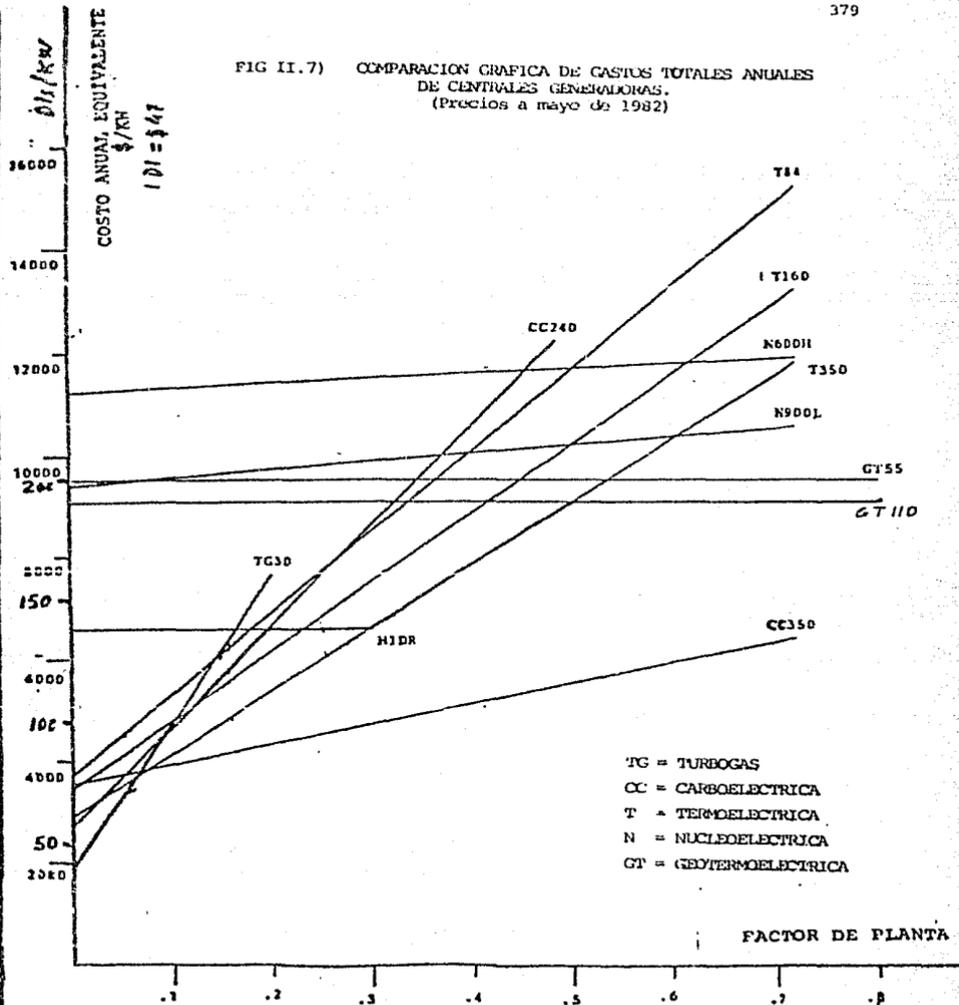
<u>TIPO DE PLANTA.</u>	<u>FACTOR DE PLANTA.</u>	<u>EFICIENCIA.</u> (%)
(a) TERMoeLECTRICA	0.7 - 0.8	30 - 33
TURBOGAS	0.20	25
CICLO COMBINADO	0.5 - 0.6	40 - 45
(a) CARBOELECTRICA	0.7 - 0.8	29 - 32
NUCLEOELECTRICA	0.6 - 0.8	30
GEOTERMoeLECTRICA	0.8 - 0.9	10 - 12
HIDROELECTRICA	0.2 - 0.6	85 - 90

(a) En México debido a problemas principalmente con las calderas, no se ha llegado a estos valores de factor de planta, siendo el promedio de 0.5 a 0.6.

Fuente: Investigación realizada por el autor.

En la figura II.7 se muestra la conveniencia de usar uno u otro tipo de planta generadora en base al factor de planta, y puede verse que a partir de factores de planta de 0.7, las plantas geotérmicas son las menos costosas, además de que por otra parte este tipo de planta trabaja sin ningún problema dentro de este rango, llegando incluso a factores de planta de 0.9

FIG II.7) COMPARACION GRAFICA DE COSTOS TOTALES ANUALES  
DE CENTRALES GENERADORAS.  
(Precios a mayo de 1982)



Fuente: Apuntes de la Materia de Energía y Desarrollo Económico, D.E.P.F.I.

U.N.A.M. (1983).

h) Operación relativamente más sencilla: La operación de - las plantas geotérmicas es de las más sencillas, ya que por una parte no se manejan fluidos a altas presiones, ni combustibles, y por la otra no se utilizan calderas, que generalmente suelen ser las -- que causan mayores problemas.

i) No crea dependencia tecnológica: En la actualidad la -- única dependencia estriba en bienes de capital muy sofisticados, lo cual con el paso del tiempo se ha ido reduciendo paulatinamente.

Si se dividen a las plantas geotérmicas dentro de 2 grandes áreas que son pozos y central, se puede ver que en la primera - de ellas el porcentaje de integración nacional es del 90%, reducción dose las importaciones a un 10%, por lo que respecta a la central - esta se subdivide en equipo, que representa un 30% de la inversión, y en materiales, mano de obra y obra civil, que representa el 70% - restante. A su vez de la parte correspondiente a equipo el 20% es de fabricación nacional y el 10% son importaciones, mientras que -- del 70% de materiales, mano de obra y obra civil, su totalidad es nacional. En términos generales puede hablarse de un porcentaje - de integración nacional del 70%, el cual es un valor muy similar al de las plantas termoeléctricas convencionales, con la ventaja de no consumirse ningún tipo de combustible.

Por otra parte, se tiene pensado reducir esta dependencia de manera considerable en un lapso a mediano plazo, por medio de la entrada en operación de pequeños turbogeneradores de 5 MW, que se - planea sean construidos en México con tecnología propia y materiales nacionales. De hecho, el Instituto de Investigaciones Eléctricas se encuentra ya trabajando en ello.

j) Es creadora de una gran tecnología y de personal altamente calificado: En cuestiones geotérmicas, México es prácticamente autosuficiente en tecnología, además de estarse desarrollando una tecnología propia y mejorándose la existente.

Por otro lado, el desarrollo de poco más de 30 años de la energía geotérmica en México, ha permitido la creación de un equipo de profesionales en la materia, del más alto nivel.

k) Alta Confiabilidad: Debido a que su manejo es sencillo y a que no posee elementos que puedan fallar o desconectarse fácilmente, como las calderas o los condensadores con tubos, la confiabilidad de las plantas geotérmicas es sumamente alta.

1) Se puede empezar a generar antes de haber terminado el proyecto:

Esta es una de las ventajas que se ha venido aprovechando apenas a últimas fechas, y que puede representar un gran potencial a futuro.

El hecho de que pueda empezarse a generar antes de haber terminado el proyecto, tiene grandes beneficios, los cuales son sobre todo de orden económico, debido a su influencia positiva en el costo del KW instalado, es decir, disminuye este costo, que normalmente se encuentra entre los más altos de todos los tipos de plantas.

El balance podría hacerse aún más positivo, en el momento en que se generalice la instalación de pequeñas plantas generadoras a boca de pozo, las cuales hasta el momento todavía se instalan en pequeña escala.

Por otra parte, la instalación de planta a boca de pozo -- permite satisfacer la demanda (aunque esta no debe ser excesiva) -- desde antes de terminar el proyecto y haber realizado toda la inversión, lo cual contribuye a aliviar la carga de otro tipo de plantas de una manera gradual, hasta llegar a su máximo en el momento en que quede terminado el proyecto.

Esto puede ser importante sobre todo cuando existan plantas saturadas que necesiten aliviar su carga, y que por razones inherentes a la misma demanda no puedan dejar de trabajar, lo cual las obliga a tener que trabajar hasta que se pueda terminar una planta convencional, lo cual requiere de un mayor tiempo.

De ahí que todavía quede mucho que hablar a futuro sobre este punto que el autor considera como relevante.

m) Utilizable en forma de potencia o de calor: Esta es otra de las grandes ventajas de la geotermia, sobre las otras fuentes, ya que su utilización es más versátil.

Por una parte la energía geotérmica de alta entalpía, se puede utilizar para producir electricidad, o sea potencia, mientras que por otra, la de baja entalpía se puede utilizar para producir potencia (en baja escala) o calor, siendo realmente esta su mejor y -- más eficiente utilización.

Esto no quiere decir que la energía de alta entalpía no se pueda utilizar para producir calor, sino que dados los precios actuales de los energéticos, la manera más costable de utilizarle es para la producción de electricidad.

n) Forma parte del Plan Nacional de Energía: Es este otro factor más que viene a sumarse a las múltiples ventajas de la geotermia sobre otras fuentes de energía, ya que el Gobierno Mexicano contempla dentro de sus planes y objetivos, la diversificación de las fuentes de energía entre otros muchos más.

De hecho, los objetivos específicos del Plan Nacional de Energía son los siguientes:

- i) Satisfacer las necesidades nacionales de energía primaria y secundaria.
- ii) Racionalizar la producción y el uso de la energía.
- iii) Diversificar las fuentes de energía primaria, prestando particular atención a los recursos renovables.
- iv) Integrar el sector de la energía al desarrollo del resto de la economía.
- v) Conocer con mayor precisión los recursos energéticos del país.
- vi) Fortalecer la infraestructura científica y técnica capaz de desarrollar el potencial de México en este campo y de aprovechar nuevas tecnologías.

Como puede observarse, la geotermia satisface prácticamente to dos estos objetivos plenamente, por las razones siguientes:

i) Ya que puede ser una ayuda importante, en el empeño de satisfacer las necesidades nacionales de energía, tanto primaria como secundaria.

ii) La geotermia ha demostrado a lo largo del tiempo ser una de las fuentes de energía más eficientes y racionales.

iii) La geotermia es indudablemente una fuente alterna para la producción de energía, y lo que es más importante, se le puede considerar como una fuente renovable de energía.

iv) La geotermia, dada su particularidad de ser sectorial, puede integrarse muy fácilmente a las economías locales.

v) Actualmente se realiza un censo a nivel nacional, con el objeto de precisar los recursos geotérmicos con que cuenta el país.

vi) La geotermia es una de las fuentes de energía en México -- que menor dependencia tiene, ya que esta únicamente estriba en bienes de capital y prácticamente no existe en lo referente a tecnología, ya que se cuenta con una propia, y por otro lado se sigue desarrollando y mejorando la existente.

Por lo que respecta a las ventajas, estas parecen ser mucho menores que las ventajas y a saber son las siguientes:

a) Alto costo del KW. instalado: Es tal vez esta la mayor -  
desventaja de la geotermia, con respecto a otras fuentes, ya que su  
costo por KW. instalado está entre los más caros, tanto como el nu-  
clear, y más que el hidroeléctrico. .

Sin embargo esta desventaja se ha aminorado bastante, con  
el hecho de que con la energía geotérmica se puede empezar a generar  
aun antes de haberse terminado de construir la planta, y esto es po-  
sible gracias a la instalación de pequeñas plantas a boca de pozo --  
(de 5 a 10 MW.) las cuales a pesar de que no se conozca plenamente -  
la capacidad del yacimiento, pueden empezar a generar, con lo que se  
alivia un poco la carga tan alta al KW. instalado.

De hecho esta es una solución nueva al problema, y por lo  
tanto se encuentra todavía en proceso de estudio, sin embargo su im-  
portancia podrá ser mucho mayor conforme pase el tiempo y se insta-  
len más plantas a boca de pozo, con lo cual la desventaja del alto -  
costo del KW. instalado se verá disminuida, y tal vez pueda llegar a  
equipararse al de otro tipo de plantas convencionales.

b) Inversiones en exploración muy costosas: Esta es otra -- desventaja de la geotermia con respecto a otras fuentes, ya que por -- lo general las inversiones en exploración son muy costosas, de ahí -- que se necesite localizar lo antes posible un campo geotérmico, para posteriormente poder realizar estudios más profundos y determinar -- sus posibilidades reales.

Por otro lado, la extensión de los campos geotérmicos sue- le ser muy grande, lo que se traduce en un incremento de los costos de exploración. A todo ello se suma el hecho de que hasta hace muy poco no existía ningún censo de las manifestaciones termales, lo -- cual incrementa aún más dichos costos. Se espera que con el censo de manifestaciones que actualmente realiza la C.F.E., se reducirá de manera significativa el costo futuro de las exploraciones.

Cabe aclarar que el costo de exploración "sensu stricto", -- (esto es el que se debe a la geología, geoquímica, geofísica y pozos de gradiente), representa aproximadamente el 1% del costo total del proyecto. Ocurre, sin embargo, que para efectos presupuestales, muchos pozos geotérmicos de desarrollo suelen asignarse al área de ex- ploración, cuando de hecho no lo son. En efecto, prácticamente no se ha realizado nunca en México (a diferencia de en otros países), -- un pozo con objetivos exclusivamente exploratorios, sino que todos -- los pozos tienen, además, objetivos de producción.

Por lo que si se excluyen los costos de pozos, el costo de la exploración geotérmica resulta ser sumamente pequeño.\*\*

Tomando en cuenta la asignación actual de los costos, de- be considerarse que los costos de exploración son bastante altos.

\*\* Información proporcionada al autor por el Ing. Luis C.A. Gutie- rrez Negrín, jefe de la Oficina de Geología del Departamento de Exploraciones de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la C.F.E.

c) No puede estipularse desde un principio la capacidad a instalar: Esto se debe a que cuando se encuentra un campo geotérmico hacen falta muchos estudios, que requieren de un cierto tiempo para realizarse, para poder determinar la capacidad real del yacimiento. Por lo tanto, en caso de encontrarse un campo geotérmico, la capacidad a instalar se tendrá que ir probando poco a poco, lo cual en general requerirá de algunos años. Además, esta capacidad dependerá exclusivamente de las características y potencialidad del yacimiento, con lo que habrá que adaptarse a ello, cosa que no sucede en el caso de las termoeléctricas, nucleoeeléctricas, etc., en las que puede decidirse por adelantado la capacidad a instalar, y no solo eso, sino el lugar en que se ubicarán.

D) Explotación en zonas específicas: Esta es una desventaja en el caso de los campos geotérmicos hidrotérmicos de alta entalpía, esto es, viables para la producción de electricidad, ya que se depende de su ubicación natural para poder realizar su explotación.

Esta ubicación por lo general suele estar alejada de los centros de consumo, independientemente de que por sus características propias, los campos se encuentran localizados en forma puntual, lo que obliga a que su explotación se realice también de esa forma.

Sin embargo, en lo que respecta a los campos de baja entalpía, es decir, aquellos propios para usos alternos no eléctricos, su distribución es bastante equitativa.

En el caso particular de México, las manifestaciones térmicas son tan numerosas, que prácticamente no existe el concepto de localización puntual, por lo que esta desventaja se ve disminuida de una manera importante.

Es de suma importancia hacer mención que las ventajas y desventajas mencionadas a lo largo de este capítulo, son prácticamente las mismas en cualquier parte del mundo, y en algunos casos, se presenta incluso de manera más favorable, por lo que se puede ver que su importancia no es solo privativa de México, sino de todo el mundo.

V.4) Actuales Usos Alternos en México.

Desde hace muchos años se ha venido obteniendo en los alrededores del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, en Baja California Norte, cloruro de sodio (sal común), en cantidades muy pequeñas y de manera artesanal, para consumo humano. Aunque el proceso es ineficiente, permite satisfacer las necesidades de sal de los habitantes cercanos a esta zona geotérmica, sin costo alguno.

Se encuentra en construcción en el mismo lugar una planta que obtendrá cloruro de potasio por medio de un proceso de evaporación, solera y cristalización fraccionada, que obtendrá durante la etapa de evaporación cloruro de sodio como subproducto, en una cantidad 5 veces mayor que la obtenida de cloruro de potasio. En la etapa de cristalización puede obtenerse cloruro de calcio paralelamente al cloruro de potasio, adicionalmente utilizando las sales remanentes, y por medio de otro proceso más, puede obtenerse también cloruro de litio.\*\*

Esta planta se tenía planeado que debería entrar en operación a fines de 1986, pero por recortes presupuestales a PEFIMEX, que es el encargado de desarrollarla, no entrará a funcionar hasta 1988.

\*\* Esta información le fué proporcionada al autor por los ingenieros Alfredo Ramón Mercado, Coordinador Ejecutivo de la Planta de Cerro Prieto, y Sergio Mercado González, Investigador Geotérmico de la División de Estudios de Ingeniería del IIE

El cloruro de potasio tiene varios usos potenciales, -- siendo el principal de ellos su utilización como fertilizante, utilizándose también, en menor escala, para teñir, curtir, hacer jabón, vidrio, cerámica, cerillas y explosivos; por otra parte, el cloruro de calcio se puede utilizar en la industria del petróleo como aditivo en los fluidos de perforación, y como líquido de alta densidad en los procesos de recuperación secundaria.

Además, el cloruro de litio es un material estratégico muy escaso y de alto valor en los mercados mundiales. Actualmente tiene gran demanda en la industria espacial, empleándose en diversas aleaciones para la producción de metales ligeros y resistentes, y en la fabricación de combustibles para los cohetes espaciales. Se utiliza también en la producción de aguas minerales, tabletas litíficas, baterías de acumuladores, fuejos artificiales, cohetes de señales, fotografía, soldadura de aluminio, etc.

Otro elemento que podría obtenerse es la sílice, que se sedimenta en la laguna de evaporación, y que no se aprovecha actualmente.

Resulta muy interesante contemplar también la posibilidad de obtener bicloruro de carbono y sulfuro de sodio, a partir de los gases incondensables que salen a la superficie junto con la mezcla de agua-vapor.

En la figura II.8 se muestran los usos de los diversos elementos que podrían obtenerse de la salmuera geotérmica.



En lo que se refiere al uso de la geotermia en baja entalpía, desde hace ya algunos años se han venido haciendo en Cerro Prieto diversos estudios para su aprovechamiento. \*\*

En un principio se crearon invernaderos con clima controlado, los cuales funcionaron utilizando intercambiadores de calor en invierno, y equipos de absorción de agua fría en verano. En ellos se utilizó un sistema de riego condensado aprovechando el vapor geotérmico, el cual contiene nutrientes, anejándosele por otro lado otros nutrientes contenidos en la salmuera geotérmica y que no se encuentran en el vapor, como es el caso del cloruro de potasio, el cloruro de sodio, y otros, quitándole a la vez a dicha salmuera algunos elementos nocivos como el boro, el arsénico, etc. En estos estanques e invernaderos se desarrollaron hidroponías \*\*\* en las que se cultivaron diversas especies de frutas como melón, sandía, calabaza, pepino, tomate, etc.; de verduras como el apio, zanahoria, coliflor chino, lechuga, cilantro, perejil, etc.; y de plantas medicinales como la jojoba, sábila, menta, etc.; además de desarrollarse procedimientos para la mejora de semillas.

El proyecto en sí fué todo un éxito, y demostró su factibilidad técnica y económica, por lo que ahora se pretende comercializar todo lo hecho a ese respecto.

\*\* La mayor parte de la información correspondiente a los usos en baja entalpía de la geotermia en México, le fué proporcionada al autor por el oceanólogo Gabriel Delgado Carbellido, responsable de la realización de dichos proyectos en Cerro Prieto, - Baja California Norte.

\*\*\* Cultivo de plantas sin necesidad de suelo, consistente en la siembra de semillas en arena contenida en cajones, que se sumergen en estanques llenos de agua con soluciones fertilizantes.

Se realizó también un proyecto para utilizar el vapor geotérmico con el objeto de crear vacío, sistema que a pesar de no ser muy eficiente resultaba atractivo, debido a los grandes volúmenes de vapor que se manejan, sin embargo se presentó un problema inesperado-- consistente en el ruido tan fuerte que creaban los eyectores, por lo que el proyecto se suspendió, hasta que se diseñen nuevos eyectores-- que produzcan menos ruido, a pesar de ello, el proyecto sirvió para demostrar la factibilidad técnica de crear vacío con base en sistemas geotérmicos.

Actualmente funcionan en Cerro Prieto, Baja California Norte, varios estanques de acuacultura, los cuales son calentados con el vapor geotérmico, y en los que se están desarrollando especies como el bagre, lobina, langostino, tilapia, carpas, etc., con muy buenos resultados hasta el momento. Además se han introducido recientemente peces de ornato y forrajeros\*\* con fines comerciales.

En el mismo campo se cuenta con una incubadora con capacidad para 32,000 huevos, la cual es calentada con vapor geotérmico, y se encuentra produciendo 30,000 pollitos mensuales.

\*\* Los peces de ornato son los que se utilizan para la venta comercial en los acuarios, mientras que los forrajeros son los que se crían para alimentar a los peces de ornato, o a otros peces-- que posteriormente servirán para alimentar al ser humano.

Se está realizando también un intercambiador de calor, (diseñado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas), el cual se encuentra ya a nivel de prototipo, que funcionará obteniendo calor directamente de la salmuera, por lo que se podría instalar a boca de pozo, con todas las ventajas que esto traería consigo.

Por otra parte, las oficinas de la sede de la coordinadora de Cerro Prieto I, (y próximamente las de Cerro Prieto II y III), -- cuentan ya con un sistema de refrigeración de Bromuro de Litio, con capacidad de 100 toneladas, el cual funciona utilizando el vapor geotérmico.

Si se toma en cuenta que Mexicali es una ciudad en que las temperaturas promedio en el verano andan por el orden de los 45 °C, -- se podrá apreciar aún más la importancia que tiene este sistema.

En el mismo lugar se encuentra en etapa de experimentación un módulo forrajero, el cual producirá geminado para el consumo doméstico y animal, como es el caso de la alfalfa, frijol de soya, col, rábanos, lentejas, lechuga, cebada, etc., y que funcionará por medio de un sistema de refrigeración por absorción de amoníaco-agua.

También, a nivel de ingeniería, se encuentra ya el proyecto para desarrollar un sistema de refrigeración por absorción, de Bromuro de Litio, el cual será muy semejante al utilizado en las oficinas de Cerro Prieto, pero con algunas variantes importantes, y que será utilizado en los invernaderos.

A corto plazo, se tiene un proyecto para utilizar 1000 hectáreas para la acuicultura, calentando los estanques con vapor geotérmico, además de el desarrollo de hidroponías para el cultivo de flores de ornato.

A mediano plazo se tienen proyectos para la climatización de naves de engorda y la deshidratación de especias, utilizando también para ello el vapor geotérmico.

Finalmente a largo plazo se tiene contemplado un plan sumamente ambicioso, consistente en el desarrollo de una ciudad agro-industrial, (Ciudad Cucapah), la cual funcionará y se sostendrá de manera prácticamente autosuficiente, gracias a sistemas geotérmicos.

El nombre de este desarrollo en GAAAPI, cuyas siglas significan desarrollo ganadero, agrícola, avícola, acuícola, pecuario e industrial, lo cual corrobora lo ambicioso de dicho programa, que ojalá y llegue a desarrollarse, ya que sería el primero de esta especie y único en su género.

Como puede verse, todo lo que se ha hecho en México en materia geotérmica de baja entalía, se ha visto centralizado en la planta de Cerro Prieto en Mexicali, sin embargo es de esperarse que con los nuevos desarrollos geotérmicos se lleven también a otras zonas del país en las que existan campos geotérmicos.

Independientemente de ello, es claro que en lo que respecta a los usos alternos de la energía geotérmica, esto es, en baja entalía y en obtención de minerales, todavía hay mucho por hacer e investigar, siendo este un campo que no solo en México, sino en todo el mundo, tiene muchísimo futuro.

Por otra parte también a futuro podría preverse la utilización de la energía geotérmica en sistemas de cogeneración, por lo que su utilidad se incrementaría aún más.

El autor piensa que esto debería hacerse ya, dado que en la actualidad los sobrantes de vapor (con un gran potencial térmico), prácticamente no se están utilizando.

REFERENCIAS

## ( LA GEOTERMIA )

- 1.- ALONSO, Espinosa Héctor; CONZALEZ, Salazar Arturo; RAZO, Montiel Antonio. (coordinadores) y autores varios.  
Geología de los Yacimientos Geotérmicos en México.  
Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de —  
Electricidad.  
México, septiembre de 1985.
- 2.- ALONSO, Espinosa Héctor.  
Geotermia, Una Fuente Alternativa de Energía para la Producción de —  
Electricidad.  
México, agosto de 1984.
- 3.- ALONSO, Espinosa Héctor.  
La Energía Geotérmica en México.  
Tesis de licenciatura.  
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.  
México, 1960.
- 4.- ALONSO, Espinosa Héctor.  
Potencial Geotérmico de la República Mexicana y Estrategias de —  
Desarrollo.  
Reunión para la planeación. IEPES.  
Querétaro, Qro.  
México, 1982.
- 5.- ALONSO, Espinosa Héctor.  
Situación Actual y Programas Futuros en el Aprovechamiento de la  
Energía Geotérmica para la Generación de Electricidad en la Repú  
blica Mexicana. Boletín IIE, vol. 6, N° 3.  
México, marzo de 1982

- 6.- ARMSTEAD, H. Christopher  
Geothermal Energy - Review of Research and Development.  
Paris: UNESCO, 1973.
- 7.- BANWELL, J.; MEIDAV, T.  
Geothermal Energy for the Future.  
Paper presented at 139<sup>th</sup> annual meeting of the American Association for the Advancement of Science.  
Philadelphia, U.S.A., 1971
- 8.- CARSON, C. Charles; ALLEN, A. David.  
A Program to Investigate the Engineering Feasibility of Extracting Energy from Shallow Magma Bodies.  
Geothermal Resources Council, Transactions., vol. 9.  
August, 1984.
- 9.- Comisión Federal de Electricidad.  
Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto.  
México, sin fecha.
- 10.- Ciudad Cuernavaca. Conjunto G.A.A.A.P.F.  
Folleto editado por el Gobierno del Estado de Baja California, Agroacuícola de vanguardia (Agroacuiva), NAFINSA, C.F.E., Srias. de: Agricultura y Recursos Hidráulicos y Aesca.  
México, sin fecha.
- 11.- CRANE, H. Christopher.  
Experience with Minerals Recovery from Geothermal and other brines  
Geothermal Resources Council, transactions, vol. 6. (Publicado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas en la referencia E698).  
October, 1982.

- 12.- DE ANDA, Flores Luis F.  
El Campo de Energía Geotérmica en Pathé, Estado de Hidalgo, México.  
Sobretiro de la sección I - Vulcanología del cenozoico (segundo tomo), del Congreso Geológico Internacional, celebrado en la Ciudad de México, en 1956.  
México, 1957.
- 13.- DE ANDA, Flores Luis F.  
Geotermia.  
Conferencia sustentada en la Asociación de Ingenieros Universitarios Mecánicos Electricistas.  
México, 4 de julio de 1962.
- 14.- DE ANDA, Flores Luis F.  
Geotermia.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, diciembre de 1969.
- 15.- DE ANDA, Flores Luis F.  
Geotermia.  
Enciclopedia de México, Tomo V, pags. 711-730.  
México, 1977.
- 16.- DE ANDA, Flores Luis F.; REYES, S. Carlos; TOLIVIA, M. Enrique.  
Obtención de Agua Potable a Partir del Vapor Endógeno del Campo de Cerro Prieto, Mexicali, B.C.  
Sobretiro Revista Ingeniería, vol. XLI, N° 2.  
México, abril-junio de 1971

- 17.- DIPPIDO, Ronald.  
Geothermal Electric Power, The State of the World.  
Southeastern Massachusetts University.  
U.S.A., 1985.
- 18.- DIPPIDO, Ronald  
Worldwide, Geothermal Power Development. (1984 Overview and  
Update)  
Mechanical Engineering Department, Southeastern Massachusetts  
University.  
U.S.A., 1984
- 19.- DORFMAN, H. Myron.  
The Outlook for Geopressured - Geothermal Energy and Associa--  
ted Natural Gas.  
Distinguished Author Series, Journal of Petroleum Technology.  
(Publicado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas en -  
la referencia E 831)  
U.S.A., september 1982.
- 20.- EDMOND, M. John; VAN DAMM, Karen.  
Fuentes Termales en el Fondo del Océano.  
Investigación y ciencia, N° 81.  
México, junio de 1983.
- 21.- Exploración Geotérmica en el Período de 1984-1985.  
Reporte DEX 1/85, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, julio de 1984.

- 22.- FRANCHETEAU, Jean  
The Oceanic Crust.  
Scientific American, vol. 249, No. 3.  
U.S.A., september 1983.
- 23.- Geothermal Project, Cerro Prieto, México.  
Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, marzo de 1981.
- 24.- GIBBS, Robert.  
Energy from the Earth's Heat.  
R&D National Council of Science and Technology. Conacyt.  
vol 2., No. 8.  
Mexico, may 1982.
- 25.- GONZALEZ, Salazar Arturo.  
Estado de la Geotermia en México.  
III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica.  
CIADE-CFE.  
México, Cerro Prieto, B.C., octubre 13-17 de 1980.
- 26.- GONZALEZ, Salazar Arturo.  
Recursos Geotérmicos en Latinoamérica.  
Geotermia. Revista Mexicana de Geoenergía.  
Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE., vol. 2, num. 2.  
México, agosto de 1986.

- 27.- HERNANDEZ, Galán José L.  
La Energía de la Tierra.  
Instituto de Investigaciones Eléctricas, Ed. CECSA, la. Edición.  
México, octubre de 1985.
- 28.- HIRIART, Le Bert Gerardo.  
La Energía Geotérmica en México. Situación Actual y Perspecti  
vas al año 2000.  
XII Congreso Bienal del CIME.  
México, D.F., 4-7 de noviembre de 1986.
- 29.- Informe del Grupo Técnico sobre Energía Geotérmica.  
2o. período de sesiones, Comité Preparatorio de la Conferen -  
cia de las Naciones Unidas sobre Fuentes de Energía Nuevas y -  
Renovables, Asamblea General de las Naciones Unidas. 1980.
- 30.- Informe de Operación de 1985.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, 1986.
- 31.- KRUGER, Paul; OTTE, Carel.  
Geothermal Energy Resources, Production and Stimulation.  
Stanford University.  
U.S.A., 1973.

- 32.- MEADOWS, H. Donella; MEADOWS, L. Dennis; RANDERS, Jørgen; BEHRENS III, W. William.  
Los Límites del Crecimiento. Informe del Club de Roma sobre el Predicamento de la Humanidad.  
El Fondo de Cultura Económica, 2a. reimpresión.  
México, 1975.
- 33.- MERCADO, Gonzalez Sergio; GUIZA, Lambarri Jorge.  
Evaluación Preliminar de los Recursos Geotérmicos en México.  
México, 1977.
- 34.- MERCADO, Gonzalez Sergio.  
Observación de Manifestaciones Hidrotermales a 21 °N en la Dorsal del Pacífico Este, a 2600 m de Profundidad.  
Boletín IIE.  
México, enero-febrero de 1983.
- 35.- MERCADO, Gonzalez Sergio.  
Reservorios Geotérmicos Geopresurizados.  
Boletín IIE.  
México, julio-agosto de 1986.
- 36.- Plan Maestro para el Desarrollo Geotérmico al Año 2000.  
Gerencia de Proyectos Geotermoelectrónicos, Comisión Federal de Electricidad.  
México, julio de 1984.

- 37.- Planta Geotérmica de Cerro Prieto.  
Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, C.F.E.  
México, 1979.
- 38.- Programa de Energía. Metas a 1990 y Proyecciones al año 2000.  
Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.  
México, 1980.
- 39.- PUENTE, Cruz Ignacio.  
Exploración Geológica para el Aprovechamiento del Vapor Endógeno en la Zona de Cerro Prieto, Baja California.  
Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.  
México, 1965.
- 40.- RAZO, Montiel Antonio.  
Actividades de Exploración Geotérmica en México.  
Reporte DEX 2/85, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos,  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, 1985.
- 41.- Revista Tiempo.  
Vol. XXIX, num. 753, pags. 38-41.  
México, 8 de octubre de 1956.
- 42.- ROSS, A. Peter.  
Mineral Deposits from Sea-Floor Hot Springs.  
Scientific American, vol. 254, No. 1.  
U.S.A.

- 43.- RUIZ, Elizondo Jesús; DE ANDA, Flores Luis F.; ISITA, Septién José.  
Geothermal Energy.  
Proceedings of the United Nations Conference of New Sources of Energy. Vol. II.  
Rome, august 1961.
- 44.- SAMANIEGO, Verdugo Fernando; RIVERA, Rodríguez Jesús.  
La Ingeniería de Yacimientos Geotérmicos.  
Boletín IIE, vol. 2, num. 11.  
México, noviembre de 1978.
- 45.- SIGLER, G. Edgar.  
Apuntes de la Materia Energía y Medio Ambiente.  
Maestría en Ingeniería Energética, División de Estudios de -  
Posgrado, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.  
México, 1985.
- 46.- SOTO, A. Luis; MOLINA, Cruz Adolfo.  
Exploración Submarina de Ventilas Hidrotermales en la Cuenca de Guaymas.  
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, U.N.A.M.  
México, 1985.
- 47.- VIQUEIRA, Landa Jacinto.  
Apuntes de la Materia Energía y Desarrollo Económico.  
Maestría en Ingeniería Energética, División de Estudios de -  
Posgrado, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.  
México, 1985.

- 48.- WILLIAMS, L. David.  
Submarine Geothermal Resources.  
Journal of Volcanology and Geothermal Research.  
1 (1976) 85-100. Elsevier Scientific Publishing Company.  
Amsterdam, Holland., 1976.
- 49.- YARZA, De La Torre Esperanza.  
Volcanes de México.  
Editorial Aguilar, 2a. Edición.  
México, 1971.

Yo podré no estar de acuerdo con  
tus ideas más el derecho que tie  
nes a expresarlas lo defiendo --  
con mi vida.

- Rousseau -

TERCERA PARTE: DESARROLLO DE UN PROYECTO  
GEOTERMoeLECTRICO.

Vale más saber algo acerca de todo, que saberlo todo acerca de algo.

- Pascal -

## CAP VI) ANTECEDENTES.

### VI.1) Introducción.

La realización de cualquier proyecto no tendría sentido - alguno si no fuera para satisfacer una determinada necesidad humana. Por ello, antes de realizar algún proyecto se deberá detectar la necesidad que habrá de satisfacerse con el mismo.

Como se mencionó anteriormente, en la actualidad el desarrollo de proyectos geotérmicos se ha dirigido principalmente a la satisfacción de las necesidades de energía en forma de electricidad.

Sin embargo, y debido a que los sistemas de baja entalpía son mucho más numerosos que los sistemas de alta entalpía, es imprescindible el desarrollo de sistemas cuya única finalidad sea la satisfacción, de manera económica, de necesidades energéticas en forma de energía térmica, aún y cuando no resulten convenientes para la producción de electricidad.

Adicionalmente, durante el desarrollo de proyectos de alta entalpía, deberá buscarse una mayor eficiencia promoviendo su utilización tanto para la producción de electricidad como para la producción de energía térmica.\*\*

\*\* Concepto conocido como desarrollo geotérmico integral.

En cualquier caso, deberá seguirse la máxima en el desarrollo de proyectos, que consiste en realizarlos en el menor tiempo posible, con la mejor calidad y al menor costo (Tiempo, Calidad y Costo). La optimización de esta relación dará como resultado un mejor y más eficiente proyecto geotérmico.

## VI.2 Estudio de las Necesidades de Generación.

El primer paso en el desarrollo de un proyecto geotermoelectrico consiste en la detección a nivel global (nacional) de las necesidades de energía eléctrica, la cual suele hacerse generalmente en base a los Planes Nacionales de Energía. De acuerdo a esta macroplaneación se define la capacidad, número de unidades, y localización regional de la obra, además de realizarse la planeación y programación del anteproyecto.

Posteriormente se deberán detectar las necesidades regionales requeridas, las cuales suelen estimarse en base al crecimiento normal - local, y al probable crecimiento futuro, que a su vez depende de las - previsiones de inversiones en la zona de empresas públicas y privadas, esto es, del desarrollo general de dicha zona.

Estas necesidades suelen medirse en base a la energía eléctrica necesaria neta y a la demanda máxima bruta que tendrá que satisfacerse, según las cuales se estiman las ventas totales de energía que habrán de tenerse.

Aunque en gran parte del mundo donde se desarrollan proyectos geotermoelectricos, estos suelen realizarse por los gobiernos, (como es el caso de México), en algunos países (como los Estados Unidos), estos son realizados, con mucho éxito, por industrias privadas, por lo que la detección de necesidades se hace apoyada en las estimaciones gubernamentales antes mencionadas, pero además se requiere de un estudio de mercado debido a la característica particular de estos proyectos que consiste - en tener un fin lucrativo.

Una cuestión importante que debe tomarse en cuenta es si los que desarrollan el campo serán los mismos que los operadores de la planta, ya que en caso de no ser así esto obligará a los primeros (quienes se encargan de la exploración, perforación y mantenimiento de los pozos) a ponerle un precio al vapor para poder vendérselo al operador de la planta (que se encarga de la producción y venta de la electricidad), lo cual generalmente acarreará mayores costos, además de que obligará a que cada empresa por separado haga sus estudios de necesidades de energía.\*\*

En general al desarrollar proyectos geotérmicos no se toma tanto en cuenta las necesidades globales y regionales de energía como la ubicación, economía y tamaño del yacimiento, ya que dicho desarrollo estará condicionado, básicamente, por estos últimos. Son precisamente estas características particulares de cada yacimiento geotérmico, las que hacen inoperable la extrapolación de procedimientos y resultados de un campo geotérmico a otro.

Sin embargo, la detección de las necesidades de energía sí juega un papel importante si se piensa que la magnitud y urgencia de las mismas puede acelerar, o retrasar, la construcción y desarrollo del proyecto.

\*\* La diferenciación entre los dueños de los pozos y los operadores de la planta es importante, ya que, por ejemplo, existen casos en que los primeros realizan las instalaciones necesarias para la explotación, con altos consumos de vapor, a fin de poder amortizar su inversión lo más rápido posible, sin importarles que pueda abatirse el campo (debido a su irracional explotación) antes de lo recomendable; Por otro lado los operadores de la planta necesitan de lapsos más grandes para poder amortizar su inversión, de ahí que pueda presentarse el caso de que el vapor se acabe o disminuya drásticamente antes de que los segundos hayan podido amortizar sus costos, mientras que los primeros podrán incluso abandonar el campo debido a que ya habrán recuperado su inversión e incluso habrán ganado grandes cantidades de dinero (Basado en comentarios hechos al autor por el Dr. Maurizio Girelli, ingeniero en jefe del departamento de geotermia de la compañía italiana EIC electroconsult, durante una entrevista personal).

### VI.3 Infraestructura Disponible y Necesaria.

Antes de empezar a desarrollar un proyecto, es conveniente detectar aquella infraestructura de la que se dispondrá y aquella -- que será necesaria.

La importancia y necesidad de una adecuada infraestructura en el desarrollo de un proyecto es incuestionable, ya que afectará -- de manera notable el buen desempeño del mismo.

En los proyectos geotermoeléctricos en particular, la detec ción de esta infraestructura se deberá hacer después de la localiza-- ción del yacimiento (independientemente de su tamaño y potencialidad) ya que dependerá de dicha ubicación. Esto es lo contrario de lo que o curre con otro tipo de proyectos,\*\* en los que por conocerse de antemano la localización y tamaño de la planta que habrá de instalarse puede de terminarse anticipadamente la infraestructura que habrá de necesitarse.

Existe una infraestructura que puede considerarse propia o -- interna del proyecto, como es el caso de las oficinas, bodegas, almace nas, caminos de acceso, luz, agua, etc., y que habrá de necesitarse -- por la naturaleza misma de aquel; y otra que puede considerarse como -- externa consistente en diversos servicios como teléfono, escuelas, hos pitales, comunicaciones, vivienda disponible, bomberos, vigilancia, -- centros de diversión, etc., que resulta sumamente importante debido a que todo desarrollo de un proyecto es hecho por y para seres humanos, que requerirán de dichos servicios.

\*\* Como los termoeléctricos, carboeléctricos, etc.

Es importante mencionar que la construcción de estos últimos servicios no le atañe a quién desarrolle el proyecto en sí, sino que es recomendable, y en muchos casos indispensable, que se encuentren ya en la zona. Sin embargo, si ante la necesidad de desarrollo de un proyecto, hiciera falta determinada infraestructura externa, - los responsables del desarrollo del campo deberán construirla a fin de poder llevar a buen término la obra.

Resulta también importante considerar la necesidad que se tendrá de recursos humanos, ya que se requerirán investigadores, técnicos especializados, profesionistas, personal administrativo y de servicios, etc. Por ello resulta conveniente ver la disponibilidad de los mismos en la zona.

Por otra parte, será necesario vislumbrar de manera muy somera los recursos financieros de que se dispondrá, ya que estos se necesitarán posteriormente para el pago de sueldos, servicios, adquisiciones de equipo y maquinaria, papelería, insumos, etc.

Otro aspecto que deberá tenerse en cuenta es el de la tecnología con que se cuenta para el desarrollo del proyecto, debido al papel tan importante que jugará en el mismo. No es conveniente empezar a desarrollar un proyecto si no se tiene la tecnología adecuada para ello. En caso de no tenerse deberá contemplarse la posibilidad de adquirirla del extranjero, con las desventajas que esto implica. Afortunadamente México cuenta con la tecnología requerida para el desarrollo de proyectos geotérmico-eléctricos.

#### VI.4) Diferentes Alternativas para Satisfacer las Necesidades.

En este punto deberá hacerse una evaluación preliminar - muy somera de las diferentes alternativas técnicas con que se cuenta para satisfacer las necesidades de energía. Además, deberá realizarse también un bosquejo a muy "Gróso modo" de la planeación y programación del anteproyecto.

En caso del desarrollo de proyectos geotérmoelectricos - no es posible hacer una estimación precisa de su economía, debido a que esta dependerá básicamente de las condiciones particulares - del yacimiento, sin embargo la evaluación y comparación con otras alternativas deberá mostrar (cuando menos) la conveniencia de pasar al desarrollo en sí del proyecto, el cual comienza con la exploración propiamente.

CAP. VII) ESTIMACION DE LA MAGNITUD Y POTENCIALIDAD DEL YACIMIENTO

VII.1) Exploración Preliminar.

Es aquí donde se inicia propiamente el reconocimiento de una zona geotérmica, y consiste en una búsqueda de manifestaciones superficiales termales en regiones muy extensas. Estas pueden consistir en manantiales o pozos de agua caliente, fumarolas, volcanes de lodo, etc.

Los principales métodos de exploración preliminar son los siguientes:

- a) Interpretación de imágenes de satélite: las imágenes tomadas en diversas bandas del espectro por satélites proporcionan abundante información regional sobre características geológicas asociadas con sistemas geotérmicos, como lineamientos estructurales y rocas y geofomas volcánicas. La información interpretada a partir de tales imágenes -a través de métodos matemáticos u ópticos-, puede ser tratada estadísticamente para discriminar zonas favorables dentro de regiones muy amplias.
- b) Estudios Fotogeológicos: Estos se realizan a fin de localizar estructuras, determinar la distribución de las formaciones, patrones circulares, densidades de formación, lineamientos y otras estructuras tectónicas, a través de la toma de fotografías aéreas de la zona geotérmica, y de su posterior interpretación.

- c) **Estudios Aeromagnéticos:** Se realizan midiendo la diferencia de susceptibilidad magnética en las rocas y formaciones. Estos estudios son importantes ya que pueden proveer al investigador de una visión muy general de la estructura geológica del subsuelo.
- d) **Estudios Infrarrojos:** Se realizan para medir la radiación de calor de la superficie de la tierra. Estos estudios se basan en el principio de que un yacimiento geotérmico es una fuente anómala de calor, que puede detectarse en superficie por diferencias térmicas con zonas normales.
- e) **Levantamiento Geoquímico Regional:** Consiste en el muestreo del mayor número posible de manifestaciones superficiales termales de una región determinada, para por medio del uso de geotermómetros determinar en cuales zonas existen mayores probabilidades de encontrar en su subsuelo un sistema geotérmico activo, que pueda tener posibilidades comerciales de explotación.

Es importante aclarar que no todos los métodos aquí mencionados tienen la misma importancia, ya que la interpretación de imágenes de satélites y el levantamiento geoquímico regional, por ejemplo, son mucho más importantes que los estudios aeromagnéticos. En el presente trabajo no se pretende determinar cual método es más importante, ya que saldría de los límites del mismo, sino únicamente se desea mencionar las diferentes alternativas -no necesariamente excluyentes- que se pueden tener en la exploración preliminar.

Por otra parte, la eficacia de uno u otro método dependerá en gran medida de las características particulares de la zona, - de ahí que el encargado de estudiarla deberá decidir, en base a dichas características y a su experiencia, el ó los métodos más conve- nientes para realizar la exploración.

VII.2) Exploración de Detalle.

En base a la magnitud de las manifestaciones localizadas con la exploración preliminar, se puede decidir si se llevan a cabo estudios más profundos para determinar la potencialidad de la zona.

Para ello se utilizan diversos métodos de exploración, - los cuales sirven para obtener información cuantitativa y cualitativa sobre la naturaleza y geometría de la zona de estudio. Su aplicación se enfoca básicamente a:

- Determinar las condiciones geológico-estructurales y la evolución vulcanológica del área en donde se encuentran situados los recursos geotérmicos.
- Localizar y delimitar anomalías térmicas.
- Definir condiciones estructurales particulares.
- Estimar las temperaturas probables del subsuelo.

Estos estudios se dividen en tres grandes grupos que son:

- a) Estudios Geológicos
- b) Estudios Geofísicos
- c) Estudios Geoquímicos

a) Estudios Geológicos: Estos estudios son la base de todos aquellos cuyo objetivo estriba en la búsqueda de recursos geotérmicos. Se utilizan para estudiar las características estructurales y geológicas de la zona, con objeto de estimar su potencialidad geotérmica.

Los medios que se utilizan para ello son: La observación de afloramientos; el mapeo geológico, que incluye los mapas geotectónicos, morfológicos, topográficos, etc.; la recolección de muestras; investigaciones y análisis de laboratorio; y estudios microscópicos. Todos ellos servirán de base para la detección de zonas fracturadas, mostrar alteraciones importantes de origen hidrotermal, y determinar la posible área de la zona geotérmica.

Como resultado de los estudios geológicos se obtiene un plano geológico de la zona que incluye: La delimitación de afloramientos de las diversas unidades litológicas, la localización y tipo de estructuras geológicas, la ubicación de las geoformas, el mapeo y medición de las manifestaciones termales y zonas de alteración, y el establecimiento de la historia vulcano-tectónica de la zona.

b) Estudios Geofísicos: Su objetivo estriba en la confirmación de las estructuras de la zona, y la posible localización mediante la interpretación de las anomalías, del yacimiento geotérmico; además de la estimación de sus dimensiones probables.

Estos estudios son los que presentan la mayor variedad de métodos y dan la información más precisa, pudiéndose clasificar como sigue:

i) Estudios Eléctricos: Estos estudios se basan en el principio ampliamente conocido, de que la resistencia eléctrica de las rocas se reduce cuando la temperatura aumenta; por ello la existencia de agua caliente o de rocas alteradas causa una considerable reducción de la resistencia, esto es, un aumento de la conductividad.

Los métodos eléctricos más conocidos son los de resistividad, los cuales se utilizan como ayuda en la detección de diferentes capas de materiales, en la identificación de su posible naturaleza, y en la localización de la existencia de agua caliente. Actualmente es muy utilizada la geoelectrónica resistiva, debido a los buenos resultados que con ella se han obtenido.

Dentro de este grupo queda incluido también el método de potencial natural o autopotencial, que aprovechando las diferencias de potencial eléctrico natural en el subsuelo, trata de determinar la probable existencia de un cuerpo de agua.

ii) Estudios Electromagnéticos: Estos estudios se dividen en dos grupos dependiendo de si se utilizan campos electromagnéticos naturales o artificiales. El primer grupo incluye: la magnetometría, - que se utiliza para medir las variaciones locales del campo magnético de la tierra, relacionándolas a su vez con la estructura del subsuelo siendo especialmente utilizada cuando se desea detectar estructuras - profundas del subsuelo; el método magnetotélúrico, que tiene los mismos objetivos que el método resistivo, sólo que utiliza corrientes - electromagnéticas naturales de la tierra, y aunque es muy útil presenta la desventaja de ser demasiado caro debido a que la toma de registros requiere de varios meses; el paleomagnetismo, que estudia las direcciones de magnetización remanente de las rocas, con objeto de establecer su edad, y por asociación la probable edad del yacimiento geotérmico al que se supone asociada; y otros métodos menos utilizados - como el AFMAG (Audio Frequency Magnetic Method).

El segundo grupo de métodos electromagnéticos incluye diversos métodos como el de fuentes en movimiento, Turam, ángulo de declive, AFMT (Artificial Field Magnetotelluric), etc., los cuales, en general, no son muy utilizados en el ámbito geotérmico, aunque algunos de ellos parecen presentar muy buenas perspectivas a futuro.

iii) Estudios Gravimétricos: Se utilizan para entender las estructuras bajo el subsuelo, por medio de la interpretación de los cambios en los valores de gravedad, resultantes de la diferencia en densidad entre las formaciones geológicas. El método gravimétrico es muy útil cuando se desea obtener un panorama tectónico general de un área geotérmica.

iv) Estudios Sismológicos: Estos pueden dividirse en dos grupos dependiendo de si se trata de un sismo natural o artificial.

Dentro del primer grupo se encuentra la sismica pasiva, que se utiliza para determinar la estructura del subsuelo y las condiciones de los lechos rocosos, por medio del uso de ondas sísmicas reflejadas y refractadas, cuya velocidad de transmisión depende de la consistencia de las rocas; su utilización es relativamente reciente y está dando muy buenos resultados. Otro método es el de microsismicidad, que consiste en la medición de los microsismos que generalmente acompañan a las actividades geotérmicas debido al movimiento convectivo de los fluidos geotérmicos en el subsuelo, se mide por medio de un sismógrafo de alta sensibilidad, por lo que el costo de el método se ve incrementado. Se utiliza para determinar la ubicación y extensión del probable yacimiento de los recursos geotérmicos, dando generalmente una localización bastante aproximada, en base a la determinación de enjambres de epicentros de los microsismos.

El segundo grupo de estudios sismológicos incluye uno de los métodos más utilizados, que es el de sismicidad, que sirve para lo mismo que la sismica pasiva, pero a diferencia de esta utiliza terremotos creados artificialmente, generalmente por medio de carros vibradores o explosiones, siendo de gran relevancia los resultados obtenidos. Hay algunos otros métodos sismológicos menos utilizados, como el del punto brillante, entre otros.

v) Estudios de Termometría y Flujo Térmico: Estos estudios permiten, mediante la medición de la temperatura de la tierra y el flujo de calor, estimar la salida mínima continua de calor y el tamaño y entalpía del yacimiento. Por lo tanto, suministran datos para

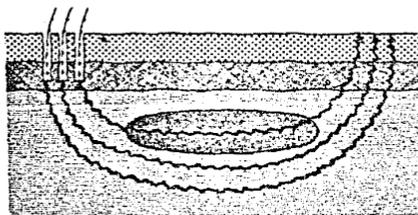
obtener el perfil del gradiente geotérmico. Se basan en el hecho de que los yacimientos geotérmicos presentan temperaturas mayores que las formaciones adyacentes, por lo que en las superficies cercanas a los yacimientos geotérmicos suelen encontrarse altas temperaturas su per fici ales y grandes cantidades de flujo de calor.

Vi) Estudios Radioactivos: Estos estudios pueden resultar ú ti les, cuando existen fallamientos en áreas geotérmicas, debido a — que la radioactividad subterránea, como la del radio o del uranio, — asciende a través de dichos fallamientos y se concentra en la superficie. Por lo tanto la medición de la densidad radioactiva, puede — permitir la localización de las fallas y por ende de los yacimientos geotérmicos.\*\*

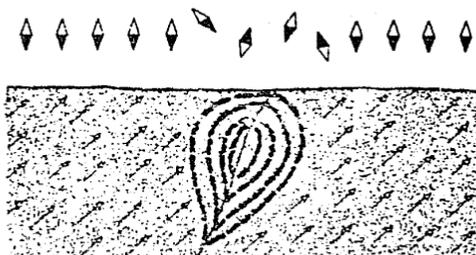
En la figura III.1 se muestran esquemáticamente los prin ci pales métodos geofísicos.

\*\* Geothermal Power Generation  
Step 1. Mitsubishi Heavy Industrie  
Tokyo, Japan. Publicado por el IIE en la  
referencia E-613.

FIGURA III.1) MÉTODOS GEOFÍSICOS MÁS UTILIZADOS.



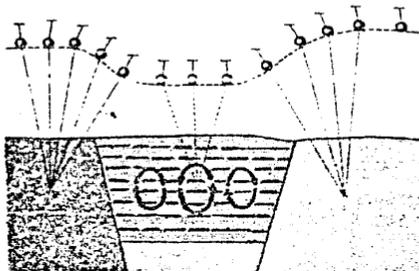
RESISTIVIDAD



MAGNETOMETRIA.

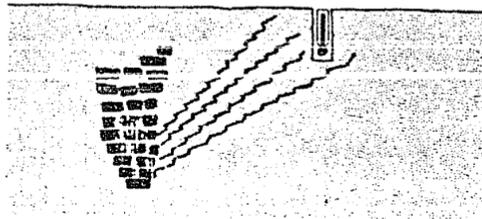
Fuente: Cerro Prieto, Underground Power. (1971).

FIGURA III.1) MÉTODOS GEOFÍSICOS MÁS UTILIZADOS. ..... (Continuación).

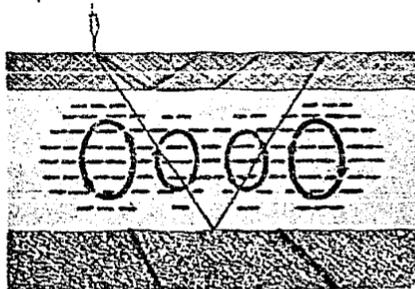


GRAVIMETRIA

Fuente: Cerro Prieto, Underground Power. (1971).



TERMOMETRIA.



SISMICIDAD.

c) Estudios Geoquímicos: En ellos se utiliza la toma de muestras de fluidos termales y no termales, para por medio de un análisis posterior, correlacionar la composición química de dichas muestras, - con la posible existencia de un yacimiento geotérmico a profundidad, y con sus temperaturas probables.

Estos estudios se pueden dividir en dos grandes grupos, - que son:

i) Estudios Geoquímicos de fluidos: Se utilizan para estudiar el medio ambiente básico de los yacimientos geotérmicos, por medio de la recolección y análisis del agua superficial, agua del subsuelo, agua caliente, vapor natural, y gas. También se utilizan para determinar la temperatura del agua caliente en el subsuelo basada en los elementos y/o compuestos químicos que contenga en solución, utilizándose para ello diversos tipos de geotermómetros.

Otra de sus aplicaciones consiste en la estimación de la velocidad del sistema de circulación del agua caliente en el subsuelo, y en determinar el origen de la misma, por medio de mediciones isotópicas.

En la tabla III.1, se muestran los principales tipos de geotermómetros. La principal característica de los mismos estriba en que proporcionan información de tipo cuantitativo, es decir, en base a modelos matemáticos se estima la probable temperatura del agua o vapor contenidos en el subsuelo.

TABLA III.1) PRINCIPALES GEOTERMOMETROS QUIMICOS UTILIZADOS EN LA ACTUALIDAD

- 1.- Na/K
- 2.- Contenido de  $\text{SiO}_2$
- 3.- Na-K-Ca
- 4.- K/Mg
- 5.- Ca y contenido de  $\text{HCO}_3$
- 6.- Mg/cá
- 7.- Na/Ca
- 8.-  $\text{CaSO}_4$
- 9.-  $\text{H}_2$ /otros gases
- 10.- Cl

Los geotermómetros incluidos en la tabla III.1 no son los únicos, pero sí los más utilizados (particularmente los cuatro primeros), y los que mejores resultados han dado. De hecho, en teoría, puede haber tantos geotermómetros como combinaciones químicas puedan ocurrirse; el problema estriba en mostrar su efectividad y veracidad.

Otro factor importante que debe considerarse al utilizar estos geotermómetros, es que su validez se encuentra dentro de ciertos rangos de temperaturas, los cuales deben conocerse para poder aplicarlos de manera correcta.

ii) Estudios Geoquímicos del Terreno: Es común en las regiones geotérmicas, que cuando el vapor o el agua caliente sale a la superficie, vayan acompañando algunos elementos "traza", que son retenidos en el terreno, por lo que su medición servirá de ayuda para un mejor entendimiento del campo.

Estos elementos "traza" son: radón, mercurio, arsénico, y dióxido de carbono. ( $\text{CO}_2$ ).

Otros indicadores utilizados en el estudio geoquímico del terreno son los depósitos de alteración hidrotermal, como los de sinter silíceo, travertino\*\*, caolín, etc. Se ha comprobado que la precipitación de sínter silíceo es mayor cuando existen temperaturas altas en el subsuelo, a diferencia de los depósitos de travertino -- que suelen presentarse cuando existen temperaturas moderadas, o de los depósitos de caolín que se presentan con temperaturas altas o moderadas.

Tanto la detección de elementos traza, como de los depósitos de alteración, proporcionan información de tipo cualitativo, acerca de las probables temperaturas del yacimiento. Aunque los depósitos de alteración hidrotermal presentan la desventaja de que pueden ser el reflejo de una actividad hidrotermal antigua, y no indicar necesariamente la presencia de altas temperaturas actuales.

La diferencia entre estos dos tipos de indicadores, estriba en que la detección de los elementos traza debe hacerse mediante

\*\* Carbonato de calcio.

recolección de muestras y análisis posterior de laboratorio, mientras que los depósitos de alteración son visibles a simple vista y no requieren de dicho análisis.

Al igual que en la exploración preliminar, es importante mencionar que no todos los métodos existentes para la exploración de detalle proporcionan los mismos resultados, ya que aunque existen algunos que tradicionalmente han dado buenos resultados, en ocasiones han fallado en ciertos campos. Este sería el caso, por ejemplo, del método de resistividad que en campos como Los Azufres, en México ha dado resultados excelentes, mientras que en Hawaii no ha funcionado, debido a las características particulares del campo (principalmente debido a la entrada de agua de mar en el yacimiento).

Existen además otros métodos que solo han funcionado bien en ciertos campos o bajo ciertas condiciones; que proporcionan datos poco precisos y confiables; o que todavía se encuentran en etapa de experimentación, por lo que no han demostrado su efectividad hasta el momento.

Por lo tanto la determinación de los métodos a utilizarse en la exploración deberá ser hecha por los especialistas responsables del desarrollo del campo, tomando en cuenta tales características.

### VII.3) Perforación Exploratoria.

Una vez que se ha obtenido una visión general de la estructura del campo geotérmico a través de los estudios mencionados anteriormente, se deberán realizar perforaciones con fines exploratorios en las zonas más prometedoras del campo, a fin de certificar la existencia y la estructura interna del yacimiento en el subsuelo.

Los resultados obtenidos sumados a toda la información de que ya se dispnía con anterioridad, permitirán obtener el primer modelo conceptual del yacimiento, que irá mejorándose conforme se tenga un mayor conocimiento del mismo en base a la perforación y explotación del campo.

Para obtener la información necesaria de los pozos deberán tomarse en los mismos diversos registros geológicos y geofísicos, además de efectuarse un análisis químico de los lodos de perforación, es to último con el fin de conocer las propiedades de los fluidos geotérmicos existentes en los estratos perforados.

a) Registros Geológicos: Más comúnmente conocidos como Control geológico de la perforación, se dividen a su vez en : Registros litológicos y registros de alteración.

i) Registros Litológicos. Su fin es reconstruir la columna litológica atravesada por el pozo, se ejecutan para identificar las características estructurales de la formación y compararlas con las de las unidades aflorantes conocidas previamente. Se realizan estudiando al microscopio las muestras de núcleos y de corales recuperadas al perforar el pozo.

ii) Registros de Alteración: Su objetivo es determinar las zonas de alteración hidrotermal, y se realizan con el fin de localizar mejor las probables rocas sello del yacimiento, y al yacimiento mismo, en base a la profundidad y grado de alteración de las rocas contenidas en las muestras. El registro consiste en la identificación y cuantificación de los minerales hidrotermales (termominerales) mediante análisis microscópico y/o de difracción de rayos X, en especial de minerales indicadores de altas temperaturas como epidota, -- biotita y anfíbolos, entre otros.

b) Registros Geofísicos: Estos registros se pueden dividir - en los siguientes grupos.

i) Registros de Temperatura: Se utilizan para registrar los cambios de temperatura del subsuelo, a través de un termostato conectado a un cable que es bajado a diferentes profundidades durante la perforación.

ii) Registros de Inducción: Se utilizan para esclarecer las condiciones del agua del subsuelo, y la porosidad de las rocas, a través de una medición continua de la resistividad dentro del pozo, realizada por medio de un sensor; así como para determinar el status geológico de las formaciones, y la salinidad del agua existente en las fisuras de la roca.

iii) Registros Sónicos: Estos registros se utilizan para determinar la porosidad de las rocas. Se basan para ello en la estrecha relación existente entre la velocidad de las ondas acústicas y la porosidad.

iv) Registros Radioactivos: Los registros radioactivos se dividen en dos tipos: El primero de ellos es el de rayos gamma, que es utilizado para graduar las rocas, por medio de la medición de los rayos gamma naturales de las mismas; y el segundo es el de neutrones, que sirve como auxiliar en la determinación de la porosidad de las rocas.

v) Registros de Presión: Se utilizan para localizar las zonas productoras, y determinar las presiones del yacimiento.

c) Análisis Químico de Lodos: Se realiza un muestreo sistemático del lodo de perforación, a fin de determinar el contenido de sulfatos, cloruros, boro, mercurio, y algunos otros elementos y compuestos, ya que estos se consideran como elementos aportados por los fluidos geotérmicos, es decir, su presencia muestra la existencia de altas temperaturas en los estratos atravesados durante la perforación.

Por otro lado se determinan también ciertas relaciones como la de  $Cl/B$  y  $Na/K$  entre otras, que son indicadoras de altas temperaturas y de la existencia de vapor.

Recientemente se ha utilizado el análisis de los gases contenidos en los lodos (particularmente del hidrógeno), que al igual que los métodos anteriores, indican la existencia de temperaturas elevadas.

Otro análisis muy importante de lodos (aunque no se trata de un análisis químico), es el que consiste en medir las pérdidas de lodos durante la perforación, las cuales permiten localizar las zonas de pérdida total o parcial, que se correlacionan con las zonas permeables que, a su vez, son las zonas productoras.

Es esencial que las mediciones y registros que se tomen en la perforación exploratoria sean realizadas lo mejor posible ya que los pozos futuros podrán tener una mejor terminación en base a la información proporcionada por dichas mediciones, además de que ayudan de manera considerable a un mejor conocimiento de las características del campo.

En la perforación exploratoria se presenta al mismo caso que la exploración preliminar y la exploración de detalle, ya que la determinación de los registros más adecuados a utilizarse deberá ser realizada por los especialistas responsables del campo.

Cabe aclarar que los pozos exploratorios son susceptibles de utilizarse posteriormente como pozos productores (en caso de que se obtuvieran producciones importantes de vapor o de mezcla agua-vapor), o como pozos reinyectores, si no presentan producción siendo sus características generales muy similares a estos últimos.

Existen también otros tipo de pozos muy pequeños utilizados en la exploración, que son los llamados pozos de gradiente, y los pozos de prueba, que suelen tener diámetros bastantes menores y ser muy someros en comparación con los pozos exploratorios, de producción o de reinyección. (En la tabla III.2 se muestran las principales diferencias entre los tipos de pozos antes mencionados).

(a)  
 TABLA III.2) DIFERENCIAS BASICAS ENTRE DIVERSOS TIPOS DE POZOS GEOTERMICOS.

		Diámetro del agujero (pulg.)	Profundidad (m)	Técnicas de Perforación																														
1	Pozos de gradiente	3 - 3 1/2	200 - 500	MESA ROTARIA (pueden usarse equipos de pulseta)																														
2	Pozos de prueba	5 1/8 - 6 1/4 - 7 5/8	500 - 1,000	MESA ROTARIA (pueden usarse equipos de pulseta)																														
3	Pozos de producción	8 1/2 - 8 3/4	500 - 1,000 < 1,500 < 2,000 < 2,500 < 3,000	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Altura de la Torre</th> <th>Diámetro de la mesa rotatoria</th> <th>Molaco-te</th> <th colspan="2">Bombas de fondo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>34 m</td> <td>17 1/4"</td> <td>T-20</td> <td>250HP</td> <td>350HP</td> </tr> <tr> <td>38 m</td> <td>20 1/2"</td> <td>T-32</td> <td>320HP</td> <td>850HP</td> </tr> <tr> <td>40.5 m</td> <td>20 1/2"</td> <td>T-45</td> <td>450HP</td> <td>1000HP</td> </tr> <tr> <td>43.3 m</td> <td>20 1/2"</td> <td>T-55</td> <td>550HP</td> <td>1400HP</td> </tr> <tr> <td>44.8 m</td> <td>27 1/2"</td> <td>T-70</td> <td>700HP</td> <td>2000HP</td> </tr> </tbody> </table>	Altura de la Torre	Diámetro de la mesa rotatoria	Molaco-te	Bombas de fondo		34 m	17 1/4"	T-20	250HP	350HP	38 m	20 1/2"	T-32	320HP	850HP	40.5 m	20 1/2"	T-45	450HP	1000HP	43.3 m	20 1/2"	T-55	550HP	1400HP	44.8 m	27 1/2"	T-70	700HP	2000HP
Altura de la Torre	Diámetro de la mesa rotatoria	Molaco-te	Bombas de fondo																															
34 m	17 1/4"	T-20	250HP	350HP																														
38 m	20 1/2"	T-32	320HP	850HP																														
40.5 m	20 1/2"	T-45	450HP	1000HP																														
43.3 m	20 1/2"	T-55	550HP	1400HP																														
44.8 m	27 1/2"	T-70	700HP	2000HP																														
4	Pozos de reinyección	8 1/2 - 10 5/8	500 - 2,000	FRITINGO CON MESA ROTARIA MAS GRANDE QUE LOS POZOS DE PRODUCCION.																														

(a) Conviene aclarar que la mayoría de los datos que aparecen aquí, son enunciativos pero no limitativos.

Fuente: Geothermal Power Generation. Step 3.

La finalidad principal de los pozos de gradiente consiste en la obtención de muestras del subsuelo para su posterior análisis, y en la medición de temperaturas con gran precisión\*\* que se extrapolan a fin de obtener las probables temperaturas del fondo.

Los pozos de prueba por su parte, tienen como fin la medición de cantidades y propiedades del vapor y agua disponibles a través del pozo\*\*\*. Este tipo de pozo no se realiza en la actualidad - en México.

Por lo que toca a la computadora esta puede ser una herramienta de mucha ayuda durante toda la etapa de estimación de la magnitud y potencialidad del yacimiento, ya que se puede emplear en programas de cálculo de modelos geológicos, geofísicos y geoquímicos, - como los de geología estructural, gravimetría, magnetometría, termometría, detección de errores de análisis químicos, etc. Además puede utilizarse en el control de los programas de exploración y perforación a través de mira crítica, pert, etc.

\*\* Debido a que los pozos de gradiente no son muy profundos, y por lo tanto no alcanzan zonas de muy altas temperaturas, se pueden utilizar equipos de gran precisión para realizar las mediciones.

\*\*\* Geothermal Power Generation.  
Step 3, Mitsubishi Heavy Industrie.  
Tokyo, Japan. Publicado por el IIE en la referencia E613.

El que sabe pensar pero no sabe expresar lo que piensa se encuentra al mismo nivel del que no sabe pensar.  
- Pericles -

#### CAP VIII) PLAN BASICO DE DESARROLLO.

Terminado el paso anterior deberá realizarse un plan de desarrollo, que permitirá seguir de manera correcta los primeros pasos para el adecuado desarrollo del proyecto, y que a pesar de ser muy básico resulta sumamente importante. Este plan deberá de tener en cuenta diversos puntos de vista como los económicos, tecnológicos, ambientales, etc.. e incluye los siguientes puntos principales:

##### VIII.1) Estimación Gruesa de la Capacidad de Generación.

El desarrollo de un campo geotérmico está basado en las estimaciones de su potencialidad energética, junto con las estimaciones de la economía de dicho desarrollo. Desafortunadamente, en la actualidad todavía no es posible estimar el potencial de un campo geotérmico con el mismo grado de precisión con que se hace en los campos petroleros o de gas.

Por ello uno de los principales y más importantes problemas de la investigación geotérmica consiste en la necesidad de desarrollar técnicas que permitan obtener una evaluación razonablemente precisa del potencial económico del recurso, durante las etapas iniciales del desarrollo.

Una limitante natural al inicio de la explotación -cuando - se toman las decisiones financieras cruciales, a fin de probar la -- factibilidad económica del desarrollo posterior-, consiste en la amplia incertidumbre existente en las estimaciones acerca del potencial del campo. Existen, sin embargo, una secuencia de estudios que pug den seguirse a fin de reducir dicha incertidumbre en corto tiempo, y simultáneamente con el desarrollo del campo.

Una vez establecido que existe un recurso geotérmico en una determinada locación, y los primeros pozos exploratorios o de producción han sido perforados, se hace uso de técnicas geológicas, geofísicas, geotérmicas y geohidrológicas, a fin de obtener un modelo conceptual del yacimiento que permita definir características como su estructura geológica e hidrológica, distribución de temperaturas y - algunos otros parámetros físico-químicos, así como la localización - de la zona de recarga (en caso de que esta exista), e incluso la localización de la fuente de calor. A partir de este momento puede - hacerse una estimación muy burda de la capacidad de generación, aunque deberán hacerse más estudios para poder precisarlo con mayor detalle.

Posteriormente el modelo conceptual se complementa con datos de permeabilidad, conductividad térmica y eléctrica, calor específico, densidad de las rocas, y porosidad obtenidos de mediciones -

\*\* Información proporcionada al autor por el M.C. Mario C. Suarez - Arriaga, del Departamento de Evaluación de Yacimientos de la Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos de la CFE.

directas de los núcleos extraídos durante la perforación, a través de la interpretación de las pruebas realizadas en los pozos<sup>\*\*</sup>; estas pruebas registran el flujo másico, la presión en la cabeza de pozo y su correspondiente presión y temperatura en el fondo del pozo, además - de coeficientes de almacenamiento y transmisibilidad (porosidades y permeabilidades), geometría del flujo yacimiento-pozo, zonas y tipos de interferencias, fronteras del yacimiento, presión media del reservorio, etc.<sup>\*\*\*</sup> A este nivel, puede realizarse ya una estimación de la capacidad de generación, a través de la estimación del calor y -- las reservas del fluido en el yacimiento, que aunque no deja de ser burda es bastante más precisa que la anterior, pudiéndose también en este punto realizar predicciones que deberán soportarse muy bien, a fin de no sufrir tropiezos posteriores.

Conviene aclarar que la estimación del potencial del yacimiento se debe seguir realizando durante prácticamente la totalidad del desarrollo y explotación del campo, para ello se utiliza el modelo generado en las dos primeras etapas, además de simulaciones numéricas de la masa y energía interna del fluido, ya sea esto en subsecciones del modelo, o en todo el modelo. Con este objeto se realizan estimaciones de las condiciones de frontera como presión de re -

\*\* Se realizan pruebas transitorias de presión, tales como las de interferencia, gasto variable, incremento y decremento de presión, pulsantes, etc.

\*\*\* Información proporcionada al autor por el M.C. Mario C. Suarez-Arriaga, del Departamento de Evaluación de Yacimientos de la Gerencia de Proyectos Geotermoelectrónicos de la CFE.

carga, acufferos superficiales conectados, etc., y los parámetros se ajustan dentro de límites razonables con el fin de poder comparar la historia en la variación de algunos parámetros fundamentales como la presión y entalpía específica de los fluidos descargados. Este modelo deberá seguirse ajustando conforme la explotación prosiga, y -- una vez hecho esto, se utiliza para predecir el futuro comportamiento del yacimiento bajo diferentes esquemas y condiciones de explotación.\*\*

Existen diversos métodos para calcular la capacidad de generación del campo, y su aplicación depende de las características de cada campo en particular, pudiendo utilizarse simultáneamente varios de ellos para tratar de tener una estimación más precisa.

Para la estimación de la capacidad de generación, la computadora representa una herramienta prácticamente irremplazable, ya -- que permite realizar la simulación del comportamiento de los yacimientos geotérmicos, el cálculo de las características termodinámicas de los flujos geotérmicos, los balances de masa del yacimiento, la variación química en el mismo, la simulación de diversos parámetros geológicos, geofísicos, geoquímicos y geohidrológicos en el yacimiento, etc., de forma mucho más rápida, segura y eficiente que -- por los métodos tradicionales de cálculo, además de que debido a lo complicado de la simulación de un yacimiento, esta sería prácticamente imposible si no se contara con la computadora.

\*\* Sin embargo, suelen necesitarse varios años para poder ajustar -- el modelo en base a los datos históricos de producción, por lo -- que, a futuro, lo más racional y seguro será la utilización de -- modelos basados en el tratamiento estadístico de la información fundamental y el uso de procesos estocásticos.

## VIII.2) Planeación y Programación de la Perforación.

Una vez que se ha probado durante la exploración y perforación exploratoria la existencia de un yacimiento geotérmico de alta temperatura, con la suficiente permeabilidad para ser productor, se rá necesario probar que se puede tener la suficiente cantidad de vapor en la superficie, para poder operar económicamente una planta de un determinado tamaño.

Por ello será necesario perforar pozos, que a su vez deberán ser planeados y programados adecuadamente a fin de construirlos de la manera más eficiente y económica.

La planeación de los trabajos de perforación, en un campo geotérmico, involucra siempre un cierto grado de incertidumbre debido a la imprecisión existente en la localización de los fluidos geotérmicos, y en el conocimiento de sus características. Por ello aún después de investigaciones preliminares resulta arriesgado tratar de dar un pronóstico preciso acerca de las características técnicas de la perforación a realizarse, o de su eficiencia.

Si bien es necesario obtener la información suficiente para estimar, aunque solo sea de manera aproximada, el tiempo y costos involucrados en el proceso de perforación, todos los planes que darán condicionados a los resultados obtenidos durante la perforación, pudiendo modificarse los mismos, debido a las circunstancias e irse mejorando las técnicas y procedimientos conforme se vaya conociendo el campo.

\*\* Esto es, a boca de pozo.

El primer paso en la planeación consiste en la determinación del número de pozos que habrán de perforarse, y en la elección de los sitios de perforación. En el caso de que se haya decidido reinyectar, por resultar conveniente, deberá determinarse también el número de pozos de reinyección y su ubicación. Esto se deberá hacer en base a la información y resultados obtenidos durante las etapas de exploración y perforación exploratoria, y deberán de tenerse en cuenta criterios geológico-vulcanológicos, estructurales, estratigráficos, hidrogeológicos, geotérmicos, tectonodinámicos, y técnico-económicos, así como la topografía y características mecánicas del terreno\*\*. Además deberá tenerse en cuenta la existencia de vías de acceso a los lugares donde se pretenda realizar la perforación, ya que en caso de no existir las vías adecuadas deberá planearse su construcción.

No existe un criterio definido para la ubicación de los pozos aplicable a cualquier campo, ya que las condiciones topográficas y geológicas varían mucho con cada uno; sin embargo si debe tenerse en cuenta que, por lo general, la ubicación de los pozos en los campos volcánicos será más difícil que en los campos sedimentarios, debido a la heterogeneidad de los primeros, que los hace requerir de un conocimiento más detallado del campo.

\*\* Para el lector que desee información más detallada al respecto, se sugiere consultar el documento Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica, III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica. OLADE-CFE, 1980.

Simultáneamente deberá realizarse el plan técnico de perforación, consistente en la determinación de los parámetros básicos.

En el, en base al tipo de campo y de formación, deberán darse las especificaciones técnicas del equipo de perforación y de los equipos auxiliares, y determinarse diversos aspectos, como el programa de cementación, calidad de las tuberías de acero y capacidad mecánica, profundidad y diámetro de los pozos, frecuencia y profundidad a que deberán tomarse los núcleos y muestras de lodos, frecuencia y tipo de pruebas que habrán de realizarse, tipo de juntas, accesorios para las cementaciones, tipo de terminación, y tipo de cemento.

La profundidad de perforación se determinará en base a los resultados obtenidos durante la exploración y la perforación exploratoria\*. Debido a que los yacimientos geotérmicos son con frecuencia muy complejos y dependen en su mayoría de la existencia de fracturas, que son generalmente muy erráticas, la determinación de las posibles zonas productoras puede ser sumamente imprecisa, por lo que suele suceder que habiéndose detectado altas temperaturas en el subsuelo, los pozos perforados no puedan producir debido a la falta de permeabilidad; por lo que deberá perforarse a mayor profundidad y ya que así se tendrán generalmente más probabilidades de intersectar una zona permeable o de fracturas (aunque esto no necesariamente asegure el obtener producción). También en ocasiones resulta conveniente terminar los pozos direccionalmente para interceptar las fracturas productoras.

\*\* Posteriormente se deberá determinar agregando a lo anterior la información proveniente de los últimos pozos perforados.

Es por ello que resulta sumamente conveniente tener en los sitios de perforación equipos con capacidad mayor a la que previamente se haya estimado\*\*. Además deberá planearse la perforación de un número extra de pozos, suficiente para garantizar la disponibilidad de fluidos que requiera la planta, teniendo en cuenta que, por otra parte, se necesitarán pozos de substitución para poder mantener de manera continua la producción elegida (Al perderse producción por incrustaciones o colapsos en los pozos).

La explotación de un yacimiento geotérmico por medio de la perforación puede causar dos efectos. El primero de ellos es que la descarga puede causar una disminución constante de la presión interna del yacimiento, que se traduce en un abatimiento en la producción del pozo y en la consecuente reducción de la vida económica del proyecto\*\*\*. El segundo de ellos puede ser un abatimiento en la producción de los pozos, debido a su cercanía, lo que produce una interferencia en la producción de los mismos.

Por eso es necesario escoger de manera adecuada los tamaños, diámetros de tubería y espaciamiento entre pozos que permitirán mantener un flujo constante y una invariabilidad substancial en las propiedades de los fluidos geotérmicos durante un largo período, haciendo también un análisis económico a fin de tomar la decisión más conveniente.

\*\* Normalmente de un 10 a un 15% de exceso de capacidad.

\*\*\* Los defensores de la teoría de que la geotermia no es un recurso renovable, sostienen que este abatimiento es un proceso natural en cualquier campo sometido a explotación.

Aunque no parece haber relación entre los dos efectos antes mencionados, nunca han sido estimados de manera satisfactoria antes de la perforación y desarrollo del campo en ninguna parte del mundo.\*\*

La menor distancia posible de perforación entre pozos está determinada por el espaciamiento entre los mismos, y la de menor costo queda definida por el costo de desarrollo del campo, debido a que las líneas de conducción de los fluidos geotérmicos tienen costos muy altos.

En la práctica, y ante la incertidumbre existente, lo que se hace es desarrollar el campo por partes, manteniendo en un principio un espacio grande entre pozos,\*\* poniendo especial atención en -- las posibles caídas de presión debidas a la interacción entre los pozos,\*\*\*\* lo cual se toma como base para la realización de extrapolaciones soportadas en teorías todavía no muy bien fundamentadas, a fin de estimar valores futuros. No es sino hasta después de conocer muy bien el campo cuando podrá determinarse de manera correcta cual es el espacio óptimo de separación entre pozos para una región determinada.

\*\* Geothermal Power Generation, Step. 2, Mitsubishi Heavy Industrie, Tokyo, Japan. Publicado por el IIE en la referencia E621.

\*\*\* Idem al anterior.

\*\*\*\* Estas pueden determinarse mediante pruebas de interferencia y pulsantes entre los pozos.

Una vez determinadas todas las características técnicas anteriores, podrá realizarse un presupuesto de perforación en base a los costos de los equipos y materiales auxiliares necesarios, y al tiempo que tomará dicha perforación.

Posteriormente deberá realizarse un programa de perforación que contemple todos los preparativos necesarios para realizarla como la construcción de las vías de acceso necesarias, la preparación de los sitios de perforación, la transportación e instalación en dichos sitios de todos los equipos y materiales que se necesitarán; además deberán realizarse todas las obras complementarias para la perforación, como oficinas, campamentos, almacenes, etc.

Este programa de perforación deberá tener en cuenta ya todas las características que influyan o puedan influir en el proceso, como la topografía del lugar; la facilidad de acceso al mismo; la dureza de las formaciones a perforar; la capacidad de los equipos; la profundidad de perforación; las probables pérdidas de circulación, etc.

Es conveniente que todo el proceso se controle por medio de diversas herramientas que serán muy útiles para ello, como la ruta crítica, pert y computadora, pudiéndose incluso introducir los programas de ruta crítica y pert dentro de la computadora, lo cual agiliza el control además de hacerlo más eficiente.

Otro punto relevante que deberá determinarse es el de ---, quién realizará la perforación, esto es, si se hará por medio de un contratista o por administración. Esto resulta sumamente importante ya que no debe olvidarse que la perforación de pozos es una de las actividades más costosas en el desarrollo de proyectos geotérmicos.

### VIII.3) Determinación del Uso de los Fluidos de Desecho.

Deberá determinarse antes de perforar (aunque solo sea de manera preliminar), que es lo que habrá de hacerse con los fluidos - geotérmicos sobrantes del proceso de producción de electricidad. Es to es, deberá decidirse si se mandarán a una laguna de evaporación; se arrojarán a la atmósfera, al mar o ríos; se reinyectarán; se usará en aplicaciones de baja entalpía, en la industria, ganadería, agricultura, etc; o se tratarán para obtener minerales de ellos.

Si la información disponible no es suficiente para poder determinar esto de manera precisa, habrá que esperarse a analizar las - características de los pozos, para posteriormente, durante la ingeniería básica (capítulo XI) hacerlo. Sin embargo, si es conveniente tener ya una idea de lo que se hará con ellos, lo cual generalmente podrá hacerse desde esta etapa.

La determinación del uso de los fluidos de desecho resulta también muy importante ya que deberá preverse que no afecten el medio ambiente al descargarse, debido a su alto contenido de sales y de algunas otras sustancias que pueden ser de olor muy desagradable (como el  $H_2S$  y el borato), o peligrosos. Esto es particularmente importante con los ciclos binarios que utilizan sustancias fluyables como el isobutano.

"Aprende a pensar", ya que pensando siempre se llega a la verdad.

- Antiguo Proverbio Griego -

## CAP IX) PERFORACION DE LOS POZOS DE PRODUCCION Y DE REINYECCION.

Cuando, en base a las exploraciones y a la perforación exploratoria, se tiene un buen indicio de la existencia de acumulaciones importantes de vapor endógeno, se realiza la perforación de pozos de producción para poder llevar a la superficie dichos recursos geotérmicos; además, si se pretende reinyectar el agua de desecho -- (salmuera supersaturada), deberán planearse y perforarse también los pozos de reinyección.

### IX.1) Equipos y Técnicas Utilizadas en la Perforación de Pozos Geotérmicos.

Para realizar la perforación en los campos geotérmicos, -- existen tres técnicas básicas:

- Perforación con equipos rotarios con circulación de agua espumante o aireada: Este es un método relativamente nuevo, que ha tenido una gran aceptación en Nueva Zelanda, y aunque no es todavía muy -- utilizado a nivel mundial sus perspectivas a futuro parecen ser -- bastante buenas. Entre sus ventajas se tiene que permite un me-- jor control de los fluidos contenidos en la formación, y un mayor avance en la perforación. Presenta, sin embargo, la desventaja de tener problemas de corrosión y erosión en las tuberías de perforación, que por otra parte son remediables.\*\*

\*\* Información proporcionada al autor por el Ing. Felipe Arenas García, jefe de la Oficina de Ingeniería de Perforación, del Departamento -- de Perforación, de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de -- la CFE.

- Perforación con equipos rotarios con circulación de aire: Este es otro método bastante eficiente y con gran aceptación en los E.U.A. y Japón, utilizado principalmente en yacimientos de vapor. Tiene la ventaja de ser de 3 a 4 veces más rápido perforando<sup>\*\*</sup>, que el método tradicional de enfriamiento con lodos, y más barato ya que reduce los costos en tiempo de equipo. Presenta además la ventaja de no dañar la zona de producción, ya que no existe inyección de lodos durante la perforación. Su desventaja consiste en que el método no es apropiado para formaciones con alta producción de agua<sup>\*\*\*</sup>, y/o con una fuerte tendencia a derrumbarse<sup>\*\*\*\*</sup>. Por ello en la práctica suele espesarse la perforación de la formación con lodo, y posteriormente, si las condiciones son propicias, continuarla con aire como medio de enfriamiento (de hecho se utiliza principalmente en las zonas secas o en las de producción). Otro de los problemas que presenta la utilización de la perforación con aire estriba en la corrosión excesiva a que induce su uso, y en los costos de la sarta de perforación, por lo que se requerirá un análisis técnico-económico a fin de poder justificar el uso de esta técnica de perforación, su utilización resulta particularmente atractiva en los campos de vapor dominante. En México se ha utilizado esta técnica con resultados variables en los campos de Los Azufres, Michoacán, y La Primavera, Jalisco.

- \*\* Geothermal Power Generation.  
Step 3, Mitsubishi Heavy Industrie.  
Tokyo, Japan. Publicado por el IIE en la referencia E623.
- \*\*\* Debido a que la intrusión de esta en la formación disminuye la eficiencia de circulación del aire.
- \*\*\*\* Geothermal Power Generation.  
Step 3, Mitsubishi Heavy Industrie.  
Tokyo, Japan. Publicado por el IIE en la referencia E623

La perforación con aire es básicamente igual que con lodos, de ahí que los equipos puedan adaptarse para utilizar sistemas de enfriamiento aire/lodo. En la figura III.2 se muestra un esquema típico de un equipo de perforación con circulación de aire.

- Perforación con equipos rotarios con circulación de lodos: Este es el método más utilizado en todo el mundo, debido más que nada, a que se tomó de la tecnología petrolera, realizándosele pequeños cambios a fin de adaptarlo a la perforación de pozos geotérmicos.

En la figura III.3 se muestra un esquema típico de este equipo de perforación, y de la terminación de un pozo geotérmico.

En los capítulos siguientes se ahondará un poco más sobre este tipo de equipo.

Conviene mencionar que existen otros equipos de perforación, como los de pulseta, que actualmente son totalmente obsoletos - por lo que prácticamente se les ha desechado para fines de perforación geotérmica. Tienen la ventaja de tener bajos costos de perforación, pero se encuentran limitados porque solo permiten la perforación de pozos secos y la utilización de barrenas pequeñas.

Una técnica que suele ser utilizada (y que no depende del tipo de equipo que se utilice para perforar) es la perforación direccional, existen varias causas por las que se deberá realizar este tipo de perforación; estas son:

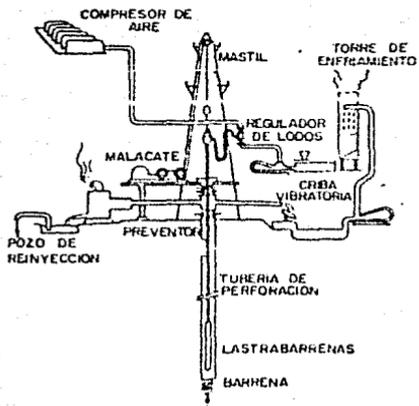
- Cuando se encuentra una zona productora y no se puede perforar -- exactamente arriba de ella, debido a diversas causas como la existencia de barrancos, montañas, falta de caminos de acceso, etc. por lo que resulta conveniente terminar los pozos direccionalmente a fin de interceptar las fracturas.
- Cuando al estar perforando se presenta un pescad<sup>o</sup> \*\* muy difícil de recuperar, que hace más conveniente desviarse en la perforación, pudiéndose regresar después a la dirección original (desviación transitoria) o no (desviación permanente), según lo ameriten las circunstancias.
- Para interceptar fallas productoras en campos de medio ambiente -- volcánico.
- Cuando al estar perforando un pozo vertical este falle, o se descubra que está en una posición inadecuada, puede realizarse una desviación hacia la zona de interés.
- Para tener concentrada la producción de varios pozos en una sola - plataforma de perforación ("isletas de producción").

La desviación deberá realizarse siempre a profundidades someras donde la temperatura no constituya un impedimento, debido a -- que el ángulo y dirección de la perforación no puede medirse a altas temperaturas \*\*\*.

\*\* Se denomina pescad<sup>o</sup> a cualquier herramienta, accesorio o equipo que se pierda dentro del pozo obstaculizando la perforación y que -- obligue a sacarlo para continuar perforando.

\*\*\* Geothermal Power Generation.  
Step 3, Mitsubishi Heavy Industrie.  
Tokyo, Japan. Publicado por el IIE en la referencia E623

FIGURA III.2) EQUIPO DE PERFORACION CON CIRCULACION DE AIRE.



Fuente: Geothermal Power Generation. Step 3.



IX.2) Diferencias Básicas entre la Perforación Geotérmica y la Perforación Petrolera.

Como se mencionó anteriormente, los equipos rotarios de perforación con enfriamiento a base de lodos son, con mucho, los más utilizados actualmente en el mundo.

Los equipos y técnicas utilizadas en la perforación de pozos geotérmicos con este tipo de equipo, son similares a las que se utilizan en la perforación de pozos petroleros, con algunas diferencias que son:

- La necesidad del enfriamiento de los lodos de perforación (lo que obliga a tener que utilizar una torre de enfriamiento para los mismos.)
- El tratamiento químico del lodo de perforación, (Debido a las altas temperaturas con que sale) \*\*
- Mayores pérdidas de circulación ocasionadas por una elevada permeabilidad primaria y secundaria de los yacimientos geotérmicos.

\*\* Estas pueden ser de 100 °C en superficie y 300 °C a 1,500 m.

- El requerimiento de una tubería de producción de mayor diámetro (8 1/2 - 10 5/8 pulg.), construida con aceros especiales y con uniones de rosca en las tuberías de adena de mayor resistencia.
- Utilización de cementos con aditivos especiales (que sean capaces de resistir el efecto de los fluidos geotérmicos) para la colocación y cementado de adenes.
- La cementación de adenes y tubería de producción se realiza en su totalidad (desde la zapata hasta la superficie).
- Las terminaciones no se efectúan con el uso de empaques (ya que no resistirían las altas temperaturas).

\*\* Sin embargo la profundidad promedio de los pozos geotérmicos -- (1,000 a 3,500 m. aproximadamente), es menor que la de los pozos petroleros.

Los lodos utilizados durante la perforación son similares a los que se utilizan en la perforación petrolera, y sus propósitos son transportar los recortes de perforación\*\* del fondo del pozo a la superficie; enfriar y lubricar la barrena; estabilizar las paredes del pozo; y moderar la presión de los fluidos en el pozo, ya -- que al llegar los lodos a la zona productora constituyen un obstáculo que impide que el agua o vapor caliente a presión puedan subir -- por el pozo. De esta manera la columna de lodos equilibra la presión del yacimiento.

La composición actual de los lodos es muy compleja, habiendo una relativa variedad de los mismos en base a los aditivos que se le anexan. En geotermia, lo común consiste en la utilización de lodos bentoníticos, adicionándoseles diferentes aditivos dependiendo -- de las condiciones particulares del yacimiento y de los propósitos -- que se persigan. Los aditivos a su vez tienen 3 funciones básicas -- que son evitar la contaminación de los lodos, mantener sus propiedades tixotrópicas en condiciones de alta temperatura, y ayudar a los lodos a taponar de una manera más eficaz las zonas de pérdidas, y -- con ello disminuir las pérdidas de circulación en zonas no productoras.

Para el primer caso los aditivos más utilizados son el carbonato de sodio (para evitar contaminaciones del cemento) e hidróxido de sodio (para evitar contaminación en formaciones calcáreas).

Para el segundo caso los más utilizados son el CL-CLS (cro molignito-cromolignisulfonato), y el polielectrolito orgánico que es

\*\* Por definición se denominan cortes o recortes a los sólidos de tamaño grande que se producen como consecuencia de la perforación y que son acarreados por el flujo de lodo.

el empleado para las temperaturas más altas.

Finalmente, para el tercer caso los aditivos de mayor uso son el silicato de sodio, los polímeros orgánicos, y diversos tipos de obturantes orgánicos e inorgánicos.\*\*\*

A continuación, y sin entrar en mayores detalles por estar fuera de los alcances del presente trabajo, el autor tratará de dar una muy breve definición de las principales diferencias en los equipos básicos usados en perforación geotérmica y petrolera.

**Malacate:** Sería conveniente que la potencia del mismo fuera mayor que la de uno similar para la misma profundidad en un pozo petrolero, debido a que la tubería de revestimiento utilizada en los pozos geotérmicos es de mayor peso para un determinado grado, que la utilizada de manera convencional en los pozos petroleros. En la práctica, los malacatos de la industria petrolera y geotérmica suelen ser iguales, debido a que, por lo general, los equipos de perforación utilizados en la industria geotérmica provienen de la industria petrolera, anexándoseles únicamente la torre de enfriamiento.

**Mesa Rotaria:** Es recomendable que tenga una abertura más grande en el centro que la que se utiliza convencionalmente en la industria petrolera en equipos de la misma capacidad, debido a que las tuberías de revestimiento son de mayor diámetro que las que se utilizan normalmente en la industria petrolera. Al igual que en el caso del malacate, esto no sucede en la práctica.

\*\*\* Información proporcionada al autor por el Ing. Bernardo Domínguez Aguirre, Asesor Técnico de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE.

**Torre de Enfriamiento:** Debido a que los lodos utilizados en la perforación de pozos geotérmicos, salen a la superficie con temperaturas considerablemente mayores que los utilizados en la perforación de pozos petroleros, resulta indispensable la utilización de una torre de enfriamiento a fin de disminuir la temperatura de dichos lodos, su rango de enfriamiento deberá ser no menor de  $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ . La torre de enfriamiento es un elemento característico de los equipos de perforación geotérmica, y constituye a la vez la principal diferencia entre estos últimos y los de la industria petrolera.

**Fuente de Energía:** Aunque la energía suele ser proporcionada por máquinas diesel o máquinas de corriente directa, para el caso de la geotermia resulta interesante contemplar la posibilidad de poder utilizar el vapor geotérmico no utilizado o sobrante de otros pozos,\*\* y que normalmente suele desperdiciarse, como fuente de energía.

El gasto de vapor necesario sería pequeño en comparación con la producción de casi cualquier pozo, aunque se requerirán vapor ductos para poder transportar el vapor hasta los equipos de perforación, y dichos vapor ductos son bastante caros, por lo que resulta imprescindible realizar un estudio técnico-económico a fin de poder demostrar la conveniencia o no de utilizar el citado vapor.

El mencionado estudio deberá realizarse en cada campo, ya que los resultados obtenidos en uno no son susceptibles de extrapolarse a ningún otro campo.

\*\* Esto resulta particularmente interesante cuando el campo no ha sido desarrollado en su totalidad, y por lo tanto no se desviaría de la producción de electricidad el vapor utilizado en los equipos de perforación.

IX.3) Puntos más importantes a Considerar al Realizar la Perforación.

Al realizar la perforación de los pozos, existen una serie de puntos primordiales que deben considerarse para llevar a buen término la misma; estos son:

- Tubería de Revestimiento: Debido a que esta se utilizará para la producción de grandes volúmenes de vapor endógeno, deberá ser capaz de resistir vibraciones, fricciones, corrosión, etc., y además deberá poder permanecer en servicio durante el mayor tiempo posible.

Como se mencionó anteriormente las tuberías geotérmicas de revestimiento son mayores que las utilizadas en los pozos petroleros en perforaciones del mismo diámetro, lo cual se hace con el fin de asegurar un mínimo espacio entre la parte exterior de la tubería y las paredes del pozo. Todo ello reditúa no solo en la obtención de un mayor volumen de fluidos del yacimiento, sino que también disminuye las pérdidas de presión en la tubería y las vibraciones, alargando su uso, lo que, por consiguiente, alarga la vida del pozo.

Es importante que se realice una adecuada planeación del programa de instalación de la tubería de revestimiento y de sus accesorios, ya que deberán poder colocarse con toda facilidad a cada una de las profundidades provistas (que a su vez fueron determinadas como la más adecuada). En caso de no hacerse así, y si se presentara infiltración de agua de las formaciones superiores, resultará imposible obtener un flujo continuo de vapor proveniente de las formaciones inferiores. Es norma común aceptar como valor máximo de desviación de la tubería de revestimiento un 3% por cada 1,000 m.

IX.3) Puntos más importantes a Considerar al Realizar la Perforación.

Al realizar la perforación de los pozos, existen una serie de puntos primordiales que deben considerarse para llevar a buen término la misma; estos son:

- Tubería de Revestimiento: Debido a que esta se utilizará para la producción de grandes volúmenes de vapor endógeno, deberá ser capaz de resistir vibraciones, fricciones, corrosión, etc., y además deberá poder permanecer en servicio durante el mayor tiempo posible.

Como se mencionó anteriormente las tuberías geotérmicas de revestimiento son mayores que las utilizadas en los pozos petroleros en perforaciones del mismo diámetro, lo cual se hace con el fin de asegurar un mínimo espacio entre la parte exterior de la tubería y las paredes del pozo. Todo ello redundará no solo en la obtención de un mayor volumen de fluidos del yacimiento, sino que también disminuirá las pérdidas de presión en la tubería y las vibraciones, alargando su uso, lo que, por consiguiente, alarga la vida del pozo.

Es importante que se realice una adecuada planeación del programa de instalación de la tubería de revestimiento y de sus accesorios, ya que deberán poder colocarse con toda facilidad a cada una de las profundidades previstas (que a su vez fueron determinadas como la más adecuadas). En caso de no hacerse así, y si se presentara infiltración de agua de las formaciones superiores, resultará imposible obtener un flujo continuo de vapor proveniente de las formaciones inferiores. En norma común aceptar como valor máximo de desviación de la tubería de revestimiento un 3% por cada 1,000 m.

- Comentario: El punto más importante al realizar la cementación de un pozo geotérmico consiste en lograr que la mezcla de cemento pueda subir de manera uniforme y continua desde la base de la tubería, hasta la superficie.\*\* Deberá prepararse además una cantidad de cemento excedente, que varía entre 1.5 y 1.7 veces la cantidad requerida estimada,\*\* para reponer las pérdidas existentes.

durante la cementación deberán evitarse presiones elevadas que puedan inducir pérdidas de circulación.\*\*\*\*

Debe considerarse también la cantidad y tipo de gases que vendrán con los fluidos geotérmicos, ya que algunos de ellos como el  $H_2S$ , y el  $H_2SO_3$ , pueden producir daños severos a la tubería de cementación y al cemento mismo, por lo que, en esos casos, será necesario la utilización de cementos especiales resistentes a los ácidos, sobre todo cuando los fluidos vengán acompañados de agua caliente de bajo pH.

Por lo tanto, la selección del tipo de cementos y aditivos se hará en base a las características litológicas y a las temperaturas existentes en el tramo a cementar.\*\*\*\*\* Los accesorios para dirigir y controlar la cementación deberán ser especiales para resistir altas temperaturas.

\*\* Geothermal Power Generation.

Step. 3, Mitsubishi Heavy Industries.

Tokyo, Japan. Publicado por el IIE en la referencia E623.

\*\*\* Idem al anterior.

\*\*\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica  
III Seminario sobre Desarrollo y Explotación geotérmica.  
OLADE-CFE, 1980.

\*\*\*\*\* Idem al anterior.

Debe realizarse una limpieza de los restos de cemento, - tapones y coples, a fin de poder continuar la perforación de acuerdo al programa, para ello se utilizan barrenas, y preferentemente, moli nos.

Durante esta operación deberán tomarse precauciones a -- fin de evitar daños a la tubería de ademe y provocar desprendimien-- tos de tramos de la misma.

- Selección de las Barrenas: La adecuada selección de estas tendrá una repercusión muy importante en el costo y tiempo de desarrollo del pozo. La selección se realiza en base al tipo de formaciones existen tes en el subsuelo, esto es, el tipo de barrena utilizada para la por foración de una formación blanda, no será la misma que la utilizada - para la perforación de una formación dura. Actualmente se divide a - las barrenas en duras, semiduras y blandas, diferenciándose entre e-- llas en base al tamaño, forma y material de sus dientes.

Las barrenas para formaciones blandas se caracterizan por usar -- dientes grandes, mientras que las utilizadas en formaciones duras se caracterizan por tener insertos de carburo de tungsteno.

\*\* Artefacto propio para machacar, triturar o pulverizar piedras u otras materias.

- Selección de Lodos: Deberá escogerse aquel que resulte más económico y adecuado para el caso, ya que la correcta selección del mismo influirá de manera importante en los costos y en el buen desarrollo de los pozos. No debiendo menospreciarse la utilización de aditivos, cuando estos sean necesarios.

Las pérdidas de lodos (pérdidas de circulación) resultan ser considerablemente mayores que en la perforación de pozos petroleros y de gas, debido a que, como se mencionó anteriormente, la mayoría de las zonas geotérmicas se encuentran en regiones volcánicas altamente fracturadas y fisuradas, que facilitan la pérdida de los fluidos de perforación y por lo tanto hace más lento y riesgoso el proceso de perforación.

- Terminación del Pozo: La determinación de la zona ó zonas más confiables de producción, para obtener resultados óptimos, se basa en el análisis de varios factores siendo los más importantes los siguientes: Columna litológica, registros eléctricos, temperatura del lodo de perforación a la entrada y salida del pozo, registros de temperatura, y análisis mineralógico de las muestras del canal.\*\*

Las terminaciones en las zonas de producción pueden dividirse en tres tipos:

Agujero abierto sin adorno: Esta terminación puede utilizarse con cierta reserva en formaciones con gran estabilidad, y que aún durante la explotación no causen derrumbes y desprendimientos que puedan dañar el pozo.

\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica.  
III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica.  
GLADE-CFE, 1980

Tubería corta ranurada sin cemento: En este tipo de terminación de ben ajustarse con gran cuidado las zonas abiertas a explotación para evitar el ingreso de aguas de más baja temperatura que las que se de sea explotar.

Tubería cementada al fondo y disparos: En esta terminación se ce-menta hasta el fondo y se perfora después la tubería usando disparos

Tiene la ventaja de permitir seleccionar los intervalos que deben quedar abiertos, pero queda limitada por la resistencia -- del equipo a las altas temperaturas, y por su alto costo. Presentándose además el riesgo de invadir las formaciones productoras con cemento.

En este punto deberá hacerse una comparación entre los - costos y tiempos de perforación reales, frente al presupuesto y programa de perforación realizados durante la etapa que, en este trabajo, se denominó como planeación y programación de la perforación --- (cap VIII.2).

Es conveniente que durante el proceso de perforación se utilice la computadora (o al menos calculadoras programables), como auxiliares en el desarrollo de programas hidráulicos, cálculo de peso sobre las barrenas, optimización de la velocidad de circulación de los lodos, diámetros de la tobera\*\*, gasto de la bomba, información general de los pozos, graficación de características de los pozos -- (como temperatura contra presión), etc.

\*\* También conocida comúnmente con su nombre en inglés (jets), orificios existentes en la punta de la barrera, y que sirven para - permitir el paso de los lodos de perforación.

#### IX.4) Pozos de Reinyección.

Los objetivos básicos de la reinyección consisten en el mantenimiento de la presión y temperatura del yacimiento, a fin de poder sostener un ciclo que permita explotar -de forma óptima y comercial-, los recursos geotérmicos; así como el desecho adecuado de los fluidos geotérmicos. Por lo que la reinyección se presenta como una solución apropiada a los problemas de contaminación ambiental, permitiendo además disminuir las posibilidades de asentamientos del terreno por efectos de la explotación.

Para poder lograr esto deben perforarse pozos que suelen ser muy similares a los de producción, con algunas variantes en sus programas de perforación, y en algunas características (consultar la tabla - III.2) que deben de tenerse en cuenta antes de proceder a realizarlos.

Se considera que en los pozos seleccionados para la reinyección deben encontrarse las siguientes condiciones básicas:

- 1.- Que estén terminados en una formación con permeabilidad adecuada.
- 2.- Que no afecten las formaciones productoras.

Dependiendo de la zona en que se realice la reinyección, esta puede considerarse como dentro o fuera del yacimiento, pero en ambos casos deberá darse en condiciones termodinámicas favorables al mismo. En general la reinyección dentro del yacimiento deberá realizar-

se cuando se tenga un mayor conocimiento del mismo, a fin de no correr el riesgo de afectar su presión y temperatura, mientras que la reinyección fuera del yacimiento se deberá realizar cuando se tenga un conocimiento menor de las características del campo, pero se conozca lo suficiente para saber que los fluidos inyectados sí van a llegar al yacimiento. Esta segunda opción tiene la ventaja de ser menos riesgosa para el yacimiento.

Atendiendo a la temperatura a que se reinyecte, esta puede realizarse en frío o en caliente. La inyección en caliente es aquella que se realiza tomando el agua del separador del pozo productor, llevándola al pozo inyector, y suele hacerse a través de tuberías de acero. La inyección en frío se realiza cuando se recoge agua de algún recipiente que ha servido para enfriarla y para la deposición de sales, y de ahí se conduce al pozo inyector, lo cual suele hacerse con tuberías de polietileno debido a los bajos rangos de presión y temperatura.\*\*

En realidad se trata de definiciones convencionales, ya que estrictamente hablando, para el yacimiento, la reinyección siempre será en frío.

Durante la perforación de los pozos tanto de producción como de reinyección, deberán efectuarse también registros en los mismos, a fin de complementar el conocimiento del campo, los cuales no necesitan ser tan frecuentes como en la fase de exploración, debido a que ya se conocen con mayor detalle las características del campo.

\*\* Actualización a Abril de 1985 de la Inyección en el Campo Geotérmico de Los Azufres, Michoacán.  
Oficina de Reinyección, Gerencia de Proyectos Geotermoelectrónicos, CFE. Morelia, Michoacán, junio de 1985.

IX.5) Equipo Superficial de un Pozo Típico.

Las instalaciones superficiales pueden dividirse en dos grupos básicos: Instalaciones de obra civil e instalaciones de obra mecánica.

a) Instalaciones de Obra Civil.

Dentro de las obras civiles deberá realizarse la localización y trazo topográfico de la posible zona geotérmica; construcción de los caminos de acceso; plataforma; localización de las fuentes suministro de agua, o en caso de no existir tales, construcción del pozo para poder obtenerla; drenaje para dar salida tanto a los fluidos geotérmicos, como a las aguas de desecho y los desechos de perforación, - los cuales, todos ellos, deben ser manejados con mucho cuidado a fin de no contaminar el medio ambiente; silenciador; soportes de tuberías; base para el separador; etc.\*\*

A continuación, por considerarlos muy importantes el autor, se hace una muy breve descripción de las principales características de la plataforma, contrapozo y silenciador.

\*\* En general para el diseño de estos equipos deberá tenerse en cuenta si se trata de campos sedimentarios o volcánicos, ya que normalmente en los primeros el proyecto de tuberías, colectores, ramales, etc., será más fácil. Aunque, desde luego, cada campo tendrá características particulares que obligarán a un diseño específico para cada caso.

**Plataforma:** Al diseñarla deberán tomarse en cuenta el tamaño de los - equipos de perforación utilizados y las características de las instala - ciones superficiales de plataforma que requerirá el pozo.

Las plataformas deberán estar perfectamente compactadas con el fin de que los equipos de perforación no vayan a sufrir hundimien - tos que puedan inclinar los equipos y dificulten la perforación, dando lugar a pozos desviados.

**Contrapozo:** Tiene como principales objetivos permitir la realización de maniobras con holgura, como la instalación del cabezal; la conexión de este con el carrito reductor y a su vez la de este con la válvula - maestra, así como la inspección y mantenimiento de las mismas; inspec - ción de la soldadura del cabezal; permitir la cercanía del nivel supe - rior de la plataforma al árbol de válvulas, facilitando las maniobras y mantenimiento del mismo; apoyar el árbol de válvulas y evitar la pre - sencia de aguas freáticas que son corrosivas.

**Silenciador:** Los principales objetivos del o los silenciadores con - sisten en amortiguar el ruido de la descarga del pozo y disminuir las - velocidades de flujo. Pueden ser horizontales o verticales; los hori - zontales son más sencillos pero tienen el inconveniente de requerir un área grande de descarga, ya que de no hacerse así se producen erosio - nes en la plataforma y equipos próximos.\*\*

Los silenciadores verticales pueden ser muy sencillos o un - poco más completos (chimeneas de concreto armado), y su elección depen - da del uso o aplicación que se pretenda. Tienen la ventaja sobre -

\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica.  
III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica.  
GLADE-CPE, 1980.

los horizontales de surmas eficientes en la disminución del ruido y de la velocidad de flujo, y en permitir la medición de los caudales de agua a través del canal vertedor. Los silenciadores presentan la ventaja de que pueden hacerse tanto fijos como portátiles, lo cual les da una gran versatilidad.

b) Intalaciones de Obra Mecánica.

Las principales instalaciones mecánicas superficiales son:

Arbol de válvulas: También conocido como árbol de navidad, su función es controlar el flujo a la salida del pozo, por medio de un conjunto de válvulas, además de regular la descarga de fluidos a separadores, silenciadores y ductos.

El árbol de válvulas se encuentra generalmente constituido por los siguientes elementos: Cabezal, carrito de expansión, válvula maestra, y válvula de operación, aunque pueden variar de un campo a otro dependiendo de las características de cada uno. Todos estos elementos deberán trabajar con un amplio margen de seguridad tanto para el equipo como para los operarios; además deberán diseñarse para soportar tanto las tuberías como las cargas debidas a los desplazamientos por dilatación.

Soporte del Arbol de Válvulas: El árbol es soportado por la propia tubería de anclaje del pozo, y deberá centrarse por medio de una estructura metálica a fin de evitar movimientos laterales que puedan poner en peligro al personal, pozo e instalaciones. La función del soporte y la estructura metálica es la de transmitir al terreno las cargas de los elementos soportados, y evitar su eventual caída.

**Instrumentación:** El equipo mínimo recomendable a instalar en un pozo geotérmico consiste en un indicador y registrador continuo de presión y temperatura. Además resulta conveniente la instalación de un indicador con escala graduada a fin de poder conocer los desplazamientos verticales del árbol de válvulas<sup>\*\*</sup>; y del equipo básico para realizar monitoreos químicos.

**Separador, Válvula de Esfera e Instalaciones Complementarias:** Los separadores que se utilizan con mayor frecuencia en los campos de agua dominante son del tipo centrífugo, y deberán estar protegidos contra sobrepresiones por medio de discos de ruptura. Las válvulas de esfera tienen por misión impedir el paso de agua a la turbina en caso de que el separador llegara a fallar. Otro equipo que resulta muy importante en los campos de tipo sedimentario es el desarenador, que tiene como función primordial evitar el paso de arena a la turbina, a la vez que eliminar la humedad arrastrada por el vapor.

**\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica.  
III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica.  
OLADE-CFE, 1980.**

IX.6) Desarrollo de un Pozo Geotérmico.

Una vez que se ha terminado la construcción de los pozos - productores, se necesitan una serie de etapas\*\* para poder llegar a la evaluación que permitirá conocer sus características de producción.

Estos pasos son cruciales para poder conservar en buen estado las condiciones mecánicas de los pozos, y son los siguientes:

- a) Observación
- b) Calentamiento
- c) Inducción
- d) Desarrollo
- e) Evaluación

a) Observación: Una vez terminadas las operaciones de perforación y limpieza (lavado) del pozo, deberá instalarse el equipo de observación consistente en manómetros, registradores de presión e indicadores de elongación de la tubería\*\*\* que permitan reunir la información suficiente para juzgar la evolución del pozo.

\*\* Originalmente el sistema de apertura e inicio de explotación de los pozos geotérmicos fue similar al utilizado en los pozos petroleros, consistente en una apertura inmediata a la terminación del pozo con lo que se originaba un incremento súbito de temperatura y presión que causaba, debido a dilataciones térmicas, complicaciones mecánicas en la superficie y el subsuelo como fallas, colapsos de tuberías, invasión de arena, fracturas, etc.

\*\*\* Debido a su expansión longitudinal, como consecuencia de los efectos térmicos.

En esta etapa se va calentando el agua dentro del pozo hasta alcanzar las temperaturas de las formaciones geológicas circundantes, el proceso natural de calentamiento no deberá acelerarse de manera incontrolada, ya que pueden ocasionarse problemas en la tubería.

La duración de la etapa de observación dependerá de cada caso específico, y durante esta las presiones en el pozo tenderán a equilibrarse con las del yacimiento, por lo que es necesario correr registros de presión a fin de determinar las presiones originales del yacimiento y poder hacer comparaciones posteriores. \*\*

b) Calentamiento: Esta etapa es el paso siguiente después del desarrollo, y persigue elevar gradualmente la temperatura de la cabeza de pozo, tuberías, y de ser posible, de la formación geológica circundante, todo bajo absoluto control.

El período de calentamiento se inicia con el flujo espontáneo de agua al pozo, y se hace de manera lenta, con la idea de permitir el calentamiento de todo el pozo en sí, y de las formaciones circundantes. Es muy importante que el período de calentamiento se realice lo más pronto posible después de haber terminado de construir el pozo, con el fin de evitar problemas de corrosión en las tuberías. -

Aunque su duración dependa de varios factores como la terminación del pozo, temperatura y presión del yacimiento, dilatación de las tuberías, composición química de los fluidos geotérmicos, y factores económicos debido a la urgencia con que se necesite utilizar el-

\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica.  
 III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica.  
 OLADE-CFE, 1980.

vapor<sup>\*\*</sup>, la práctica recomienda un período de calentamiento no menor de 20 a 30 días<sup>\*\*\*</sup>, resultando conveniente prolongar dicha etapa cuando las condiciones lo permitan. La etapa de calentamiento termina cuando la temperatura del pozo alcanza en toda su columna valores próximos a -- los de las formaciones productoras. Cuando los pozos se autoinducen, o sea cuando fluyen sin intervención, puede pasarse directamente a la etapa de desarrollo evitándose la inducción.

c) Inducción. Esta es un paso que solo se requiere en aquellos pozos que no llegan a fluir por sí solos dentro de un tiempo razonable (30 días), por lo que se necesitará de algún medio para estimular el flujo. A lo largo del tiempo se han utilizado varios métodos de inducción entre los que se cuentan:

- i) Pistoneo
- ii) Cubeteo
- iii) Bombeo
- iv) Inyección de fluidos térmicos
- v) Inyección de aire
- vi) Presurización por gases entre otros

La selección del método a utilizar y la velocidad de inducción dependen de varios factores, siendo los más importantes el perfil de temperatura, la terminación de los pozos, y las características del yacimiento.  
\*\*\*\*

\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica.  
III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica.  
OLADE-CFE, 1980.

\*\*\* Vaca Serrano Jaime M.E.  
Análisis de pruebas de presión en pozos geotérmicos.  
Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM., 1981

\*\*\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica. (Op. Cit.)

i) Pistoneo: Es un método considerado como muy peligroso, debido a que los pistones que se utilizan tienden a empacarse; además la experiencia ha demostrado que los pozos en los que se utilizó sufrieron daños en la tubería. Este es el método que se ha utilizado tradicionalmente para el desarrollo y limpieza de pozos de agua, y ocasionalmente en pozos petroleros.

Este sistema puede producir un súbito arranque o inducción del pozo, originando un calentamiento súbito de la tubería de producción, por lo que para fines geotérmicos ya no se utiliza.

ii) Cubeteo: Este sistema es una variante del pistoneo, y utiliza una cubeta para extraer el agua del pozo (achicar el pozo), aunque resulta menos peligroso que el pistoneo, al igual que este también puede producir un arranque súbito del pozo, por lo que tampoco es utilizado.

iii) Bombeo: En este método se utiliza una bomba superficial o sumergible, dependiendo de la profundidad y perfil de temperatura, para achicar la columna hidrostática, aligerarla y propiciar el flujo de agua. Es un método razonablemente seguro, ya que puede regularse el volumen extraído y por lo tanto controlarse el calentamiento del pozo; sin embargo, el método queda limitado por la profundidad y temperatura a que puedan utilizarse las bombas.

iv) Inyección de Fluidos Geotérmicos: Este método consiste en la inyección a presión de vapor o fluidos provenientes de otro pozo con el fin de desplazar la columna de agua fría hacia el fondo, hasta lograr que el pozo al que se inyecta se presione lo suficiente, para -

que fluya por sí solo. Al igual que el pistoneo y cubeteo, se le — considera un método peligroso, y por lo tanto se ha abandonado su — uso.

V) Inyección de aire: Este es el método más utilizado en la actuali-  
dad y se puede realizar de dos maneras: Introduciendo el aire por —  
una tubería, de pequeño diámetro para burbujearlo en el agua, con el  
objeto de aligerar la columna hidrostática y achicar en forma paulati-  
na el pozo; o introduciéndolo por el espacio anular con los mismos  
líneas.  
\*\*

Vi) Presurización por gases: En este método se pueden inyectar ga-  
ses, o utilizarse los mismos gases producidos por el yacimiento, en  
ambos casos el objetivo consiste en desplazar la columna de agua has-  
ta las formaciones calientes y posteriormente despresurizar en forma  
controlada, con lo cual se logra inducir al pozo.  
\*\*\*

d) Desarrollo: Una vez terminadas las etapas de calentamiento e in-  
ducción se procede a la apertura o descarga gradual del pozo,\*\*\*\* a tra-  
vés de diámetros restringidos, que se va incrementando hasta llegar  
a la descarga máxima, que es cuando se realiza por el diámetro total  
de producción, y terminando hasta lograr la limpieza de materiales y

\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica.  
III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica  
OLADE-CFE, 1980.

\*\*\* VACA, Serrano Jaime M.E.  
Análisis de Pruebas de Presión en Pozos Geotérmicos  
Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM., 1981

\*\*\*\* Los incrementos de flujo estarán en función del contenido de  
sólidos arrastrados y de que la presión en el cabezal alcance  
su estabilización.

substancias derivadas de la perforación, y de aquellos materiales -- provenientes de la formación, como recortes asentados en el fondo, -- arena del yacimiento, etc. De esta manera se evita que al conectarse el pozo al separador y al sistema colector del fluido geotérmico, se puedan dañar las instalaciones superficiales y las turbinas de la planta.

e) Evaluación: Debido a su importancia, esta etapa se ve con bastante más detalle en el siguiente capítulo, denominado Análisis de las Características de los pozos.

Finalmente debe decidirse que una vez realizada la perforación y desarrollo de los pozos, puede procederse a su utilización directa, aún antes de conocer las características de los mismos (lo cual es cosa común en el caso de las plantas a boca de pozo); sin embargo resulta muy conveniente, y nunca estará por demás, hacer análisis posteriores de las características de los fluidos obtenidos de los pozos a fin de poder conocer mejor el yacimiento y realizar una explotación más racional y eficiente del mismo.

De hecho, si lo que se piensa instalar en el campo es una central grande, dichos estudios serán indispensables.

Enorgullecerse con el conocimiento  
es estar ciego con la luz.  
- Benjamin Franklin -

CAP X) ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS Y DE LOS FLUIDOS  
GEOTÉRMICOS.

El análisis de las características de los pozos y de las propiedades de los fluidos que salen a la superficie, como consecuencia de la perforación, resulta sumamente importante, ya que en base a dicho análisis se determinará la capacidad y tamaño de la planta geotérmica - que habrá de instalarse, además de los principales conceptos de la misma.

X.1) Evaluación de las Características de los Pozos y sus Fluidos.

Los fluidos geotérmicos (vapor, agua y gases) pueden salir a la superficie solos o mezclados en diversas proporciones, y con diversas impurezas como sales o arena. Es por ello que es necesario realizar diversas mediciones en los pozos\*\*, que utilizan tanto medios físicos como químicos, para identificar y cuantificar cada uno de los fluidos.

Estas mediciones se realizan en la superficie aprovechando el hecho de que los fluidos que llegan a la misma tienen aproximadamente la misma energía que los que llegan al pozo provenientes del yacimiento, ya que además sería muy costoso y problemático realizar las mediciones dentro de los pozos. Aunque es cierto que tanto el agua a altas temperaturas como las mezclas de agua-vapor hierven al subir a la superficie a -- acuerdo a las condiciones de saturación. De hecho, la proporción de vapor y la velocidad del flujo en cualquier punto estará determinada por -- la presión y entalpía de la mezcla.

\*\* Es recomendable que estas mediciones se realicen a diferentes presiones de prueba en el cabezal.

Existen algunas características de los pozos al fluir que deberán tenerse en cuenta antes de proceder a realizar las mediciones, estas son:

- La enorme cantidad de energía que sale a la superficie con los pozos, y que deberá ser manejada de forma segura.
- El alto nivel de ruido que se produce en la descarga a la superficie y que puede llegar a afectar a los operadores o personal que se encuentren cerca, si no se toman las debidas precauciones. Además la descarga también podría afectar la vida animal y vegetal de las zonas aledañas.
- La posible salida de gases venenosos.
- El posible alto contenido de sólidos, que puede erosionar y/o corroer las tuberías y válvulas y que debe ser medido junto con el flujo de los fluidos geotérmicos.

Las mediciones más importantes que deberán de realizarse - en los flujos provenientes de los pozos son:

- Gasto vs presión de cabezal.
- Entalpía de la mezcla agua-vapor. \*\*
- Características químicas del vapor y del agua caliente.
- Cantidad de gases no condensables.
- Características químicas de los gases no condensables.

Y sus objetivos son:

- Determinación del gasto que se puede obtener en un pozo en base a una determinada presión.
- Determinación de las curvas características de los pozos.
- Diseño de los requerimientos de ingeniería mecánica, entre los que se incluye la determinación del ciclo de la planta.
- Evaluación gruesa y rápida de la producción de cada uno de los pozos.
- Evaluar el yacimiento geotérmico bajo la superficie a fin de ayudar a determinar su posible explotación.
- Estudio básico del recurso.
- Obtención de datos de ingeniería de los pozos perforados, que sirvan de ayuda en la determinación de algunos conceptos, como las condiciones del revestimiento, depositación de minerales, niveles de permeabilidad, etc.

\*\* En el caso de campos de líquido dominante.

Es conveniente que se hagan observaciones de la presión en algunos pozos durante algún tiempo, a fin de poder obtener una indicación confiable de si se producen cambios en la calidad o cantidad de los fluidos geotérmicos. Comúnmente en las primeras horas o días de descarga de un pozo existen cambios substanciales en el flujo, ya sea repentinos por la salida de arena o lodo a la superficie, o graduales debido al ajuste de la presión del yacimiento a las condiciones de producción.

Cuando se esté evaluando un pozo nuevo es conveniente utilizar el mismo método para realizar repetidamente varias mediciones, - chequeándolas por medio de otros métodos. Igualmente si lo que se desea estudiar son los cambios con el tiempo de las condiciones en los pozos, las mediciones serán más confiables si se utiliza el mismo método para cada prueba.

Por lo anterior, frecuentemente el programa de mediciones en los pozos comprenderá un amplio rango de pruebas a intervalos incluso de meses, ligados con lecturas simultáneas de presión en el ca bezal del pozo.

La presión de prueba se obtiene mediante el estrangulamiento del flujo de los fluidos por medio de válvulas, pudiendo entonces realizarse interpolaciones gráficas para otras presiones, siempre y cuando el pozo tenga una relación uniforme entre la salida de los fluidos y el tamaño del estrangulamiento.

Al igual que en otras mediciones, el método a utilizar para la medición de los flujos estará determinado por las características mismas de los pozos (como potencia de salida, contenido de gases, etc), la cantidad de recursos disponibles, y el grado de precisión que se desea.

Básicamente existen dos tipos de mediciones que deben realizarse en los pozos: Las mediciones de flujo, que dependen del tipo de recurso con que cuente el campo que se está desarrollando; y las mediciones de concentraciones de gas.

a) Mediciones de Flujo.

Recurso Líquido Dominante.

i) Medición de mezcla a partir de presión crítica de la borbota:

Este método proporciona una medida aproximada (con errores de un 5 a un 12%\*\*) pero muy barata, del promedio de flujo total de masa y del contenido de calor (entalpía) de un fluido geotérmico de 2 fases\*\*\* que sale a través de una tubería. Es un método muy utilizado y prácticamente universal, y se basa en la teoría del flujo crítico de los fluidos. En este método se hace pasar el flujo geotérmico a través de una tubería de sección uniforme, descargándolo a la atmósfera, midiendo la presión una fracción de centímetro detrás del borde de descarga de la tubería. Aunque existen diferentes métodos para realizar esta mediciones, el más utilizado y difundido es el método empírico de Russell-James, que por otra parte, ha dado excelentes resultados. Tal vez la ventaja más grande de este método consista en que no se requiere de un gran equipo ni de separar las fases, para poder realizar las mediciones.

\*\* Información proporcionada al autor por el Ing. Bernardo Domínguez Aguirre, asesor técnico de la Gerencia de Proyectos Geotermoelectrícos de la CFE.

\*\*\* Esto es, una fase es agua y la otra vapor.

ii) Medición de fases separadas:

Este es un método sumamente exacto, pero que presenta la desventaja de requerir de ciertas instalaciones superficiales en plata forma que comúnmente no se tienen todavía en esta etapa del desarrollo del campo, por lo que generalmente se utiliza cuando los pozos se encuentran ya en la etapa de explotación. Resulta conveniente estudiar la posibilidad de tener instalaciones provisionales que pudieran utilizarse para este efecto, con fines únicamente de evaluación. La separación de las fases se realiza descargando la mezcla proveniente del pozo a un separador (normalmente del tipo centrífugo o weber); de ahí se realiza en la tubería, a la salida del separador, la medición del flujo del vapor separado, pudiéndose utilizar los métodos convencionales de orificio o cono. Para medir el agua separada, el método más recomendable consiste en descargar el flujo de agua caliente en un silenciador y medir el caudal a la salida por medio de un vertedor, simultáneamente a la medición del flujo de agua se deberá calcular la presión de separación, a fin de poder calcular la cantidad de agua que se evapora en el silenciador, y con ello poder calcular el flujo total del pozo.

Recurso Vapor Dominante:

i) Medición utilizando orificios:

La determinación del flujo en los campos con vapor dominante se realiza de manera similar a los métodos para la medición de vapor separado; esto es, se utilizan orificios perfectamente calibrados a través de los cuales pasa el vapor<sup>\*\*</sup>, y en base al diámetro de la tubería y la presión existente antes y después del orificio, se puede calcular, a través de ciertas ecuaciones termodinámicas, el flujo de vapor. Generalmente la presión medida en el orificio no diferirá de la existente en el árbol de válvulas, y los resultados obtenidos serán más exactos si se utilizan diferentes diámetros de orificios y se realizan lecturas directas de los manómetros..

ii) Medición utilizando conos:

Este método es muy similar al anterior, solo que se utilizan ciertos conos (también perfectamente calibrados), en lugar de orificios, por lo que las ecuaciones termodinámicas utilizadas son diferentes. Tanto en este método como en el anterior deberá tenerse especial atención cuando lo que se mide es vapor sobrecalentado o vapor con alto contenido de humedad.<sup>\*\*\*</sup>

\*\* El tamaño del orificio se determina en base a la proporción existente en la mezcla de gases y de vapor.

\*\*\* Para que las mediciones sean precisas, la humedad del vapor que pase a través del separador deberá ser menor al 1%.

b) Mediciones de Concentraciones de gas.

Debido a que la mayoría de los gases concentrados en la fase de vapor son no condensables, deben ser extraídos de los condensadores por medio de extractores de gas; de hecho, una de las utilizaciones — más económicas de los fluidos geotérmicos para la generación de electricidad, se da empleando turbinas con condensador en la planta.

El conocimiento preciso y detallado de las concentraciones de gas en los fluidos geotérmicos es muy importante, ya que sirve de base para el diseño del equipo y para poder mantener la máxima eficiencia de todos los equipos.

La concentración de gases en los fluidos geotérmicos puede variar durante el transcurso de la explotación, por lo que es conveniente llevar un registro y medición precisa de dicha concentración.

La cantidad y tipo de gases contenidos en los fluidos geotérmicos varía considerablemente dependiendo del tipo de yacimiento.

El gas que comúnmente predomina es el  $\text{CO}_2$ , que llega a representar hasta el 95% por peso del total de los gases contenidos.

Para mostrar mejor esto, en la tabla III.3 se exhibe el análisis químico del vapor y agua geotérmicos de diferentes campos en el mundo, y en la tabla III.4 se muestran las características de algunos campos geotérmicos del orbe.

Existen otros gases que suelen presentarse, aunque en menores proporciones, como el sulfuro de hidrógeno, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, metano y otros hidrocarburos saturados, gases inertes y amoníaco.

TABLE III.3) ANALISIS QUIMICO DEL VAPOR Y AGUA GEOTERMICOS DE  
DIVERSOS CAMPOS EN EL MUNDO.

NOMBRE DE LA CENTRAL	JAPON				EL SALVADOR	ISLANDIA	ALPURNAS	TIERRA FRIANDA	ITALIA	ALENIA	MEXICO	U S A.			
	WATKINS	ONUMA	OTAKE	WATERBURY	AMALGAMA	SAFIA	WABAS	WABAS	WABAS	WABAS	WABAS	WABAS	WABAS		
CONCEPTO	Contenido de gases no condensables (%)														
CONCEPTO	Contenido de gases no condensables (%)														
GASES NO CONDENSABLES	CO <sub>2</sub>	70.5	70.5	70.0	90.0	94.0	03.52	91.0	96.1	97.0	74.9	74.1	1.5-69.3	71.9	81.9
	H <sub>2</sub> S	12.9-17.7	23.2	1.0	1.1	6.0	15.37	6.6	3.23	2.0	19.2	20.9	1.09-2.99	0.4	5.6
	N <sub>2</sub>		4.8				0.76	2.2		0.5	0.4			21.9	1.3
	H <sub>2</sub>	0.28	1.7				0.32			0.1	4.6		12.7-14.7	0.1	1.4
	O <sub>2</sub>		0.2					0.2							
	CH <sub>4</sub>	1.15					0.03			0.4	0.6		11.8-15.3	3.6	4.9
OTROS			1.0	2.9				0.69				1.3-1.6	2.1	4.9	
Contenido de H <sub>2</sub> O (ppm)	1,062	230	50	33	120	1,537	370	76		326	600	583	0.2	22.4	
AGUA CALIENTE	LiH	7.3	4.0	4.7-8.0			7.4	6.0			7.7				
	Composición	7.9	8.4												
	Na	1,830	3,330	6,970	19,300	8,600	4,400	2,510	1,100	2,800	29,170		14,750	4,620	
	K	52-56	70-44	290-360	950	532	230	52	14		520		270		
	Ca	11	15-41	9-80	450		15	14					1,220		
	Mg	4-9	5-10	0.1-2			0.1				1		5		
	Fe	0.1-0.3	0.06				1.7				0.1		30		
	SiO <sub>2</sub>	380-412	200-250	500-1,000	650	520	925	600		820	1,250		300		
	Cl <sup>-</sup>	25-43	25-30	2,800-2,200	10,300	14.2	4,300	2,200		910	16,045		8,300		
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	18-104	295	1.3-5.1		180		34	40	18					
	AS														

Fuente: Geothermal Power Generation. Step 4.

TABLA III.4) CARACTERISTICAS DE ALGUNOS CAMPOS GEOTERMICOS EN EL MUNDO

CAMPOS	TEMPERATURA DEL YACIMIENTO (°C)	TIPO DE FLUIDO	ENTALPIA (cal/g)	PROMEDIO DE PROFUNDIDAD DE LOS POZOS (m)	SALINIDAD DEL FLUIDO (ppm)	FLUJO MASICO POR POZO (Kg/hr)	GASES NO CONDENSABLES (t)
Larderello	245	vapor	690	1,000	< 1,000	23,000	5
Los Geysers	245	vapor	670	2,500	< 1,000	70,000	1
Matsukawa	230	vapor de agua saturada	550	1,100	< 1,000	50,000	< 1
Otake	240	agua	250	500	~ 4,000	100,000	< 1
Hatchobaru	300	agua	320	1,000	~ 7,500	250,000	< 1
Wairakei	270	agua	280	1,000	12,000	-	< 1
Broadlands	280	agua	400+	1,300	-	150,000	~ 6
Fauzhetk	200	agua	195	600	3,000	60,000	-
Cerro Prieto	200+	agua	265	1,500	~ 15,000	230,000	~ 1
Niland	300+	salmuera	240	1,300	260,000	~ 200,000	< 1
Ahuachapan	230	agua	235	1,000	10,000	320,000	~ 1
Hveragerdi	260	agua	220	800	~ 1,000	250,000	~ 1
Roykjanes	280	salmuera	275	1,750	~ 40,000	~ 400,000	~ 1
Namafjall	260	agua	260	900	~ 4,000	400,000	6

+ 5 temperaturas más altas

Fuente: Geothermal Power Generation. Step 4.

Para poder medir la cantidad de gas, se toma una muestra - del flujo geotérmico (que contiene vapor, agua y gas), y se separa - en sus fases componentes por medio de un separador; se condensa el - vapor, y el gas recogido se analiza por medio de un cromatógrafo de - gases, realizándose el cálculo de los gases disueltos en el fluido - mediante la Ley de Henry.

Durante el análisis de las características de los pozos, - resulta muy conveniente la utilización de programas computacionales - como auxiliares en el cálculo y graficación de las curvas caracterís- ticas de producción y declinación de los pozos, cálculo del flujo - másico utilizando placas orificio y de las caídas de presión provoca- das por dichas placas, cálculo del diámetro de los orificios de las - placas, etc.

## X.2) Pruebas de Materiales.

Debido a que en las plantas geotérmicas el vapor de los pozos se envía directamente a la turbina, es inevitable que esta y los equipos auxiliares de la planta se vean sujetos al ataque de los gases corrosivos contenidos en los fluidos geotérmicos.

Como los problemas de corrosión afectan la vida de los materiales, las medidas a tomar a fin de evitarla son una de las principales cuestiones a resolver al diseñar la totalidad de la planta, y fundamentalmente de algunos de sus elementos principales como la turbina, condensador, sistema de transmisión de los fluidos geotérmicos y otros equipos auxiliares.

El grado con que los fluidos geotérmicos pueden corroer los materiales varía considerablemente de acuerdo a su composición química y temperatura. A su vez, la composición química de los gases varía notablemente dependiendo del área geotérmica, y en algunos casos incluso entre pozo y pozo dentro de una misma área.

Por ello es necesaria la realización de pruebas de corrosión y erosión en los materiales y equipos que trabajarán en contacto con fluidos geotérmicos corrosivos, a fin de poder determinar su comportamiento. Resulta particularmente interesante la investigación en el campo de recubrimientos protectores, que disminuyen la necesidad de utilización de materiales de alta calidad que, por otra parte, resultan muy costosos.

Algunas de las pruebas más importantes que deben realizarse en aceros y aleaciones son:

- Prueba de corrosión general en testigos.
- Prueba de Resistencia al esfuerzo.
- Prueba de fatiga por corrosión.
- Prueba de deterioro de las soldaduras.

La realización de pruebas en los materiales resulta importante, ya que después suele ocurrir que las reparaciones o cambios de equipos dañados por la corrosión o erosión resultan mucho más caras y difíciles que si se hubieran realizado previamente las citadas pruebas. De hecho, los ahorros en los costos de investigación y la selección de materiales baratos y de baja calidad, conlleva por necesidad a realizar mantenimientos costosos, que reducen el factor de utilización de los materiales, con lo que se incrementa el costo del kWh.

Lo que más se necesita para  
aprender es un espíritu humilde.  
- Confucio -

CAP XI) PLANEACION, ECONOMIA E INGENIERIA BASICA DE LA CENTRAL.

Esta etapa tiene por objeto una doble función: Primero la de aportar la información que permita hacer una evaluación económica del proyecto, y segundo la de establecer las bases técnicas sobre las que se construirá e instalará la central (en caso de que el proyecto demuestre ser económicamente atractivo).

Debe aclararse que tanto la evaluación económica como la ingeniería no se realizan de manera separada sino simultáneamente, ya que los criterios ingenieriles y termodinámicos estarán en función de la economía, y viceversa.

En el presente trabajo, por convenir así al arreglo del mismo, se verá primeramente la ingeniería básica y posteriormente se tratará lo concerniente a la evaluación económica y socioeconómica del proyecto.

## XI.1) Ingeniería Básica de la Central.

La ingeniería básica de la Central es una parte fundamental del desarrollo de un proyecto, debido a su importancia y al efecto tan decisivo que puede tener sobre los costos. Su principal diferencia con la ingeniería de detalle, estriba en que a diferencia de esta última no profundiza ni realiza estudios muy específicos sobre los equipos, sino que se hace un esquema general de la ingeniería del proyecto, tratando únicamente los puntos más importantes y básicos, para su posterior desarrollo a detalle.

A) Ciclo de la Planta: Como se mencionó con anterioridad, la diversidad en el contenido de gases y minerales, y las diferentes características físicas y químicas de los fluidos geotérmicos, definen el tipo de ciclo a utilizar para la producción de energía mecánica, y de esta a energía eléctrica. Por ello deberá determinarse que tan eficientemente se convertirá la energía geotérmica en energía eléctrica, creándose un compromiso entre la eficiencia óptima de un ciclo, y las propiedades termoquímicas del fluido geotérmico, procurando las condiciones termodinámicas que permitirán una mayor vida del yacimiento.

Sin embargo, la eficiencia en sí de la planta y de los equipos que la conforman es de menor importancia que el costo del KW instalado, por lo que también en este punto deberá crearse un equilibrio entre estos dos conceptos.

Los ciclos para las plantas geotérmicas se dividen en dos— grupos básicos, de acuerdo al tipo de recurso con que se cuenta:\*\*

a) Recurso Vapor Dominante: Este es el recurso más valioso, y menos abundante, de los recursos geotérmicos, y su utilización es mucho más fácil que la de líquido dominante, debido a que rara vez se necesita flashear y/o se requirieran equipos costosos para tratarlo antes de introducirlo en la turbina, ya que generalmente se trata de vapor-seco saturado o vapor sobrecalentado. Existen tres sistemas básicos de aprovechamiento de este tipo de recurso, que son:

1) Plantas de Condensación: Este tipo de plantas, conocidas también como plantas de vapor seco o sobrecalentado, alimentan directamente a la turbina con el flujo proveniente de los pozos, a través de un ciclo de expansión directa del vapor.\*\*\*

\*\* Aquí se habla de recursos geotérmicos hidrotermales exclusivamente, excluyéndose los otros sistemas geotérmicos (roca seca y caliente, zonas geopresurizadas, masas de magma, y geotermia submarina), que se trataron en la segunda parte de este trabajo.

\*\*\* Esto no es necesariamente cierto para plantas con vapor seco o sobrecalentado, que pueden llegar a requerir de un separador, a fin de eliminar el exceso de humedad.

Este sistema es el más simple para el aprovechamiento de -- los recursos geotérmicos,\*\* por lo que fue el primero en emplearse para la producción de electricidad. Su utilización actual es completamente comercial, siendo ejemplo de plantas que utilizan este sistema las de Larderello, Monte Amiata y Travale en Italia; Los Geysers en Estados Unidos; y Matsukawa en Japón.

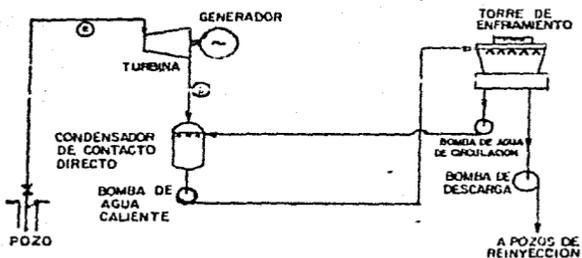
Su utilización es especialmente apropiada para la instalación de plantas de gran capacidad, aunque solo puede utilizarse en -- campos de alta entalpía y de vapor predominante.

En la figura III.4 se muestra un esquema típico de este tipo de planta.

La utilización de plantas a boca de pozo con este sistema -- si bien no es muy común, sí es factible de realizarse, siendo más comunes las plantas a boca de pozo con condensador y con recurso líquido-dominante.

\*\* Quedando el arreglo similar al de las plantas termoeléctricas convencionales, solo que en lugar de calderas se tienen pozos.

FIGURA III.4) ESQUEMA TÍPICO DE UNA PLANTA DE CONDENSACION.



a = Vapor saturado o sobrecalentado.

b = Vapor húmedo con un porcentaje de vapor seco de aproximadamente 0.9 (esto es, 90% de vapor y 10% de líquido por peso).

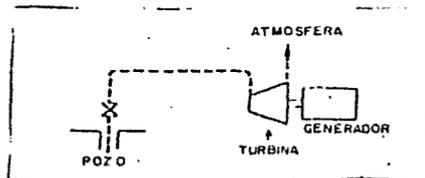
Fuente: Geothermal Energy as a Source of Electricity. (1980).

2) Plantas a Contrapresión: Se lo denomina así a cualquier tipo de planta con descarga atmosférica. Estas plantas son especialmente adecuadas para instalar bajas capacidades, resultando su costo bastante bajo, de ahí que solo se utilicen como plantas a boca de pozo.

Este tipo de planta representa una adecuada solución a los problemas debidos, principalmente, a altos contenidos de gases incondensables y/o de minerales en los fluidos geotérmicos (ya que no se requiere condensador, torre de enfriamiento, etc., que si necesitan las plantas de condensación), presentando también la mayoría de las características inherentes a las plantas de este tipo utilizadas en los campos de líquido dominante (consultar las características de este tipo de planta en la parte correspondiente a recurso líquido dominante).

En la figura III.5 se muestra un esquema de este tipo de planta, y puede apreciarse que la principal diferencia con las plantas a contrapresión para líquido dominante estriba en que no requieren de un separador antes de la turbina.

FIGURA III.5) ESQUEMA TIPOICO DE UNA PLANTA A CONTRAPRESION.  
(Vapor Dominante).



Fuente: Geothermal Power Generation. Step 5.

3) Plantas de Ciclo Binario: La utilización de este ciclo implica una alimentación indirecta de la turbina, debido a que se utiliza un fluido secundario que absorbe la energía térmica del vapor para alimentar a la turbina.

Al igual que las plantas a contrapresión -cuando el recurso con que se cuenta es vapor dominante-, su uso representa una alternativa para fluidos con alto contenido de minerales y/o de gases incondensables, aunque se encuentra todavía en etapa de estudio vía plantas piloto, a diferencia de lo que sucede con la utilización de ciclo binario con fluidos geotérmicos de líquido dominante que, bajo ciertas condiciones, ya resulta competitivo desde el punto de vista económico, por lo que por el momento resulta más atractivo; además de que es mucho mayor la existencia de campos de líquido dominante (consultar la parte correspondiente a ciclo binario con líquido dominante).

Otra alternativa a futuro puede representarse mediante la utilización de plantas binarias a boca de pozo que utilicen fluidos geotérmicos de vapor dominante.

b) **Recurso Líquido Dominante:** Este tipo de recurso es el más utilizado en todo el orbe, debido a que la mayoría de los campos geotérmicos - que se explotan actualmente en el mundo son de este tipo.

Este recurso consiste en un principio en un fluido (salmuera) en el que predomina la fase líquida, que se va convirtiendo gradualmente en vapor durante su ascenso a lo largo del pozo, saliendo finalmente una mezcla con rangos muy variables de agua-vapor, que a su vez dependen de las características del yacimiento y de la presión en el cabezal del pozo.

Existen varios sistemas para aprovechar este recurso, y la decisión entre uno u otro dependerá básicamente de la certidumbre que se tenga de la vida del yacimiento, y de factores económicos, ya que si bien es cierto que existen sistemas mucho más eficientes que otros, generalmente suelen ser más caros.

1) **Plantas de Flasheo:** Se le llama flasheo a la evaporación parcial e instantánea que se provoca en los fluidos geotérmicos como consecuencia de una disminución súbita en la presión (expansión isotérmica de la fase líquida), independientemente de si la evaporación se realiza en la tubería del pozo o en el yacimiento, obteniéndose en la cabeza de pozo vapor con rangos de calidad que varían entre un 10 y un 50%.

El arreglo a utilizar en estas plantas dependerá básicamente de la productividad de los pozos y de la potencia estimada del recurso, aunque generalmente llevan un condensador debido al aumento en la eficiencia a que esto conduce.

\*\* DIPIPO, Ronald.  
Geothermal Energy as a Source of Electricity. A Worldwide Survey of the Design and Operation of Geothermal Power Plants.  
U.S. Department of Energy, Division of Geothermal Energy, jan.1980.

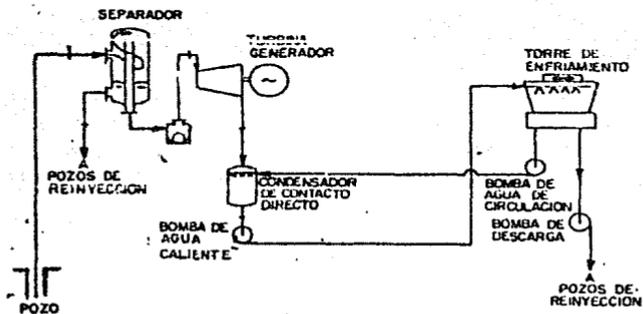
\*\*\* Idem al anterior.

Al igual que las plantas de condensación, las plantas de -- flasheo utilizan el vapor como fluido de trabajo, por lo que la mezcla en dos fases proveniente de los pozos geotérmicos debe llevarse al separador, donde se extrae el vapor que se hace pasar a través de una -- válvula esférica a fin de prevenir el paso de cantidades masivas de agua, introduciéndose dicho vapor en la línea de conducción para ser en -- vido a la turbina; suele utilizarse también un deshumidificador antes de la turbina, a fin de eliminar los condensados formados, con objeto de que el vapor llegue lo más seco posible (aproximadamente con un porcentaje de 99%) a la turbina.

Dependiendo de las condiciones del fluido, de las pérdidas -- de presión en cada flasheo, y de la optimización económica, podrán realizarse uno, dos o más flasheos. En todos los casos, el incremento -- en la generación deberá ser suficiente para poder justificar las inversiones adicionales en equipo.

**Flasheo Simple:** La eficiencia de utilización en las plantas que emplean este ciclo es menor que la de las plantas de condensación, debido a la parte del fluido geotérmico que se descarga en el separador y que no se aprovecha. Este tipo de ciclo es apropiado para la instalación de grandes capacidades de planta, y es el más popular de todos -- los ciclos, debido principalmente a que para aprovechar los campos con líquido dominante -- que por otra parte son los más numerosos--, en general resulta ser el ciclo más económico. Su utilización actual es totalmente comercial y un ejemplo lo representan las plantas L. G. G. --

FIGURA III.6) ESQUEMA TIPICO DE UNA PLANTA DE FLASHED SIMPLE.



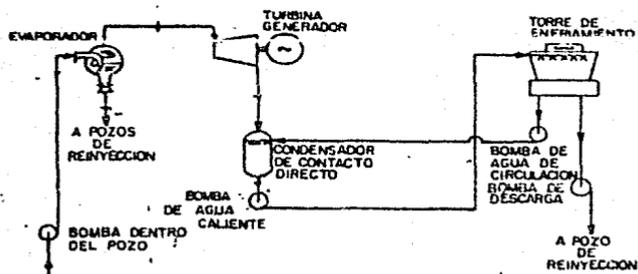
Fuente: Geothermal Energy as a Source of Electricity. (1980).

Prieto en México; Otake, Onuma, Onikobe y Kakkonda en Japón; Ahuachapán en El Salvador (unidades 1 y 1); y Puzhetka en la Unión Soviética, por nombrar solo unos cuantos.

En la figura III.6 se muestra el esquema típico de este tipo de planta.

Una variante muy interesante a las plantas de flashco simple la constituyen las plantas de flashco simple con bambú en los pozos (ver figura III.7). La instalación de bombas en el fondo de los pozos de producción resulta atractiva, ya que permite incrementar la producción de fluidos geotérmicos, y además impide la ocurrencia del flashco dentro de los pozos con lo que se evitan problemas de precipitación, incrustación y obstrucción en las tuberías y árbol de válvulas.

FIGURA III.7) ESQUEMA TÍPICO DE UNA PLANTA DE FLASHED SIMPLE CON BOMBEO EN LOS POZOS.



Fuente: Geothermal Energy as a Source of Electricity. (1980).

**Doble Flasheo:** Este término se debe a que de hecho se efectúan dos flasheos sobre la superficie, en evaporadores instantáneos separados.

En este sistema se aprovecha una parte de la energía (que en el flasheo simple se desperdicia) contenida en el agua residual proveniente del separador primario, por medio de un segundo flasheo a una presión más baja a fin de producir vapor que puede alimentar un punto secundario de la turbina dual o bien alimentar una segunda turbina de baja presión, todo ello con el fin de incrementar la eficiencia y potencia de la planta.

Dependiendo de la entalpía del fluido geotérmico, un sistema de doble flasheo puede producir entre un 15 y un 25% más de potencia que un sistema de flasheo simple bajo las mismas condiciones,\*\* aunque este incremento debe compararse con los costos adicionales -- que se generarán para poder suministrar ese exceso de vapor a la turbina, ya que, por ejemplo, se requieren algunas líneas extras de vapor, un juego de válvulas de control para cada tubería de conducción, etc., cuyo costo no es nada despreciable y puede superar incluso las ganancias en generación.

Además del aumento en generación, el ciclo de doble flasheo presenta las siguientes ventajas sobre el de flasheo simple.\*\*\*

\*\* Geothermal Power Generation.  
Step 5, Mitsubishi Heavy Industrie.  
Tokyo, Japan. Publicado por el IIE en la referencia B625.

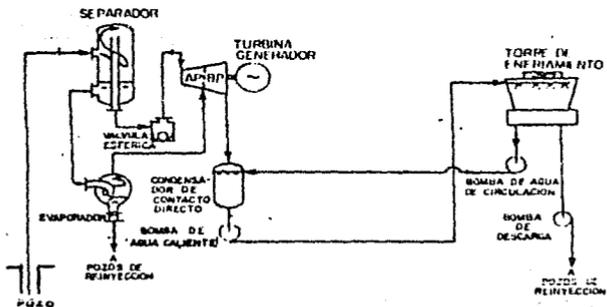
\*\*\* Idem al anterior.

- Eficiencia térmica de un 15 a un 25% mayor.
- El costo neto de generación por KWh se reduce de un 10 a un 20%.
- La presión óptima de entrada a la turbina para un mismo pozo se incrementa en un 30%.
- La humedad del vapor de entrada a la turbina se reduce en un 2% aproximadamente, con lo que se reduce la erosión de los álabes de la misma.
- La cantidad de agua caliente desechada se reduce de un 7 a un 1%.

El ciclo de doble flasheo es apropiado para plantas de gran capacidad, su utilización actual es comercial y representan un ejemplo de ello las plantas de Hatchobaru en Japón; Krafla en Islandia; y la quinta unidad de Cerro Prieto I en México. En la figura III.8 se muestra el esquema típico de este tipo de planta.

Al igual que con el flasheo simple, existe una variante en el flasheo doble consistente en la introducción de bombas dentro de los pozos, y la única diferencia con respecto a la figura III.7 consiste en que se anexa un segundo evaporador que aprovecha los fluidos de desecho del primero, convirtiéndose así en un ciclo más eficiente. Este tipo de sistema se encuentra todavía a nivel de proyecto.

FIGURA III.8) ESQUEMA TÍPICO DE UNA PLANTA DE DOBLE FLASHED.



Fuente: Geothermal Energy as a Source of Electricity. (1980).

**Multi Flasheo:** Las plantas de multi flasheo emplean vapor con tres o más niveles de presión de entrada a la turbina. En general se -- considera que más de dos flasheos no resultan atractivos, por el momento, desde el punto de vista económico. Por ejemplo, la utilización de un tercer flasheo solo incrementa la eficiencia un 0.03% con respecto a un doble flasheo, lo cual generalmente no justifica su utilización ya que exclusivamente los costos del evaporador adicional son mayores. La única planta comercial de este tipo es la de Waikarekei en Nueva Zelanda,\*\* y la razón por la que a pesar de ser de multi-flasheo resulta económica, estriba en que se requirió de un tercer flasheo a fin de poder proveer de vapor a una planta, anexa a la central geotérmica, que procesa productos químicos.

En los ciclos de flasheo, la utilización de pequeñas -- centrales (10 MW) con condensador y separador a boca de pozo parece ser una buena opción a futuro, y pueden instalarse después de haber probado por medio de plantas a contrapresión a boca de pozo la producción de los pozos. Generalmente requieren de la producción de 2 a 4 pozos, y tienen la ventaja de ser desmontables y portátiles, incluyendo la torre de enfriamiento.\*\*\*

Estas plantas pueden interconectarse a la red eléctrica o utilizarse independientemente a fin de satisfacer las necesidades de energía de una determinada región.

\*\* DIPIPO, Ronald.  
Geothermal Energy as a Source of Electricity. A Worldwide Survey of the Design and Operation of Geothermal Power Plants.  
U.S. Department of Energy, Division of Geothermal Energy, Jan. 1980.

\*\*\* Los más utilizados son los de contacto directo y los de tubos - coraza.

\*\*\*\* GUIZA, Ezkauriatza Alejandro D.  
Manual Práctico Preliminar para la Instalación de Plantas Geotérmicas a Boca de Pozo.  
Tesis de Especialidad en Geotermia, Universidad Autónoma de Baja California. México, marzo de 1986.

Su utilización debe compararse con la de plantas a contra-  
presión a boca de pozo, y solo suele resultar económica para capacida-  
des instaladas del orden de los 10MW, ya que si bien las plantas a bo-  
ca de pozo con condensador son más eficientes su costo también es ma-  
yor debido a la necesidad de equipos complementarios como condensa-  
ador, torre de enfriamiento, bombas de agua de circulación y extrac---  
ción de gases incondensables.

Como estas plantas se instalan a boca de pozo se utilizan -  
tuberías cortas, en comparación con una central, lo que implica un --  
considerable ahorro, no solo en el tendido de las mismas, sino también  
en sus correspondientes soportes y aislamiento térmico, así como en -  
las pérdidas de calor y presión debidas a largos trayectos.

2) Plantas a Contrapresión: Comúnmente conocidas también como plantas portátiles, plantas a boca de pozo, plantas portátiles con descarga atmosférica, plantas portátiles y sin condensador, etc., han tenido un gran auge en todo el mundo a últimas fechas debido a razones que se verán más adelante.

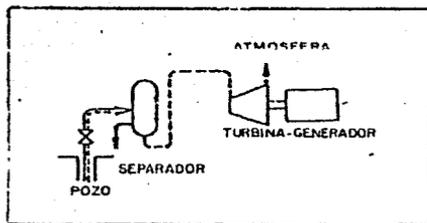
En 1985 había 40 plantas pequeñas (de menos de 5 MW) para la producción de electricidad en todo el mundo\*\*, con una capacidad total de aproximadamente 110 MW<sup>\*\*\*</sup>, que representa el 2.3% de la capacidad instalada mundial con energía geotérmica (4,762 MW).

Las plantas a contrapresión resultan especialmente adecuadas para la instalación de pequeñas unidades de generación, además de ser apropiadas para fluidos geotérmicos con alto contenido de gases; su costo por kW instalado es bajo debido a que, al igual que para el caso de vapor dominante, no requieren de condensador y sus equipos auxiliares, que incrementan el costo. Básicamente el único equipo que necesitan, aparte de la turbina y el generador, es un separador y un deshumidificador a fin de poder llevar el vapor a la turbina lo más seco posible. En la figura 111.9 se muestra el arreglo típico de una planta de este tipo. \*

\*\* Esto incluye además de las plantas a boca de pozo a contrapresión, las de condensado, ciclo binario, etc.

\*\*\* HOCHSTEIN, M.P.  
Small Geothermal Power Schemes.  
Issue N° 3, may 1986

FIGURA III.9) ESQUEMA TÍPICO DE UNA PLANTA A CONTRAPRESION.  
(Líquido Dominante).



Fuente: Geothermal Power Generation. Step 5.

Aunque el costo nominal de producir electricidad puede ser el mismo utilizando mini plantas a contrapresión o de condensación, debe tenerse en cuenta que las primeras pueden requerir cerca del doble de vapor que las segundas, dependiendo de las características del campo.

Las principales ventajas de las plantas a contrapresión a boca de pozo con respecto a las grandes centrales geotérmicas son:<sup>\*\*</sup>

- Permiten continuar o comenzar el desarrollo de proyectos geotérmicos aún y cuando no se disponga de grandes sumas de dinero. Esto resulta especialmente atractivo para los países en vía de desarrollo, con escasos recursos, o con poca experiencia en el área geotérmica.
- Permiten generar información del yacimiento, que servirá de base para poder determinar si se continúa o no con el posterior desarrollo del campo a fin de instalar a futuro una gran central, reduciendo a la vez al máximo las pérdidas que podrían tenerse si se tratara de un pozo o un campo geotérmico malo.
- Permiten empezar a recuperar la inversión de la perforación de los pozos en un lapso menor, ya que normalmente transcurre un promedio de entre 5 y 10 años desde el momento en que se perfora un pozo y aquel en que realmente empiezan a producir para alimentar a la central.

\*\* Estas han sido tomadas básicamente del libro Manual Preliminar para la Instalación de Plantas Geotermoeléctricas a Boca de Pozo de Alejandro Quiza Ezkauriatza.

- Se ahorran grandes cantidades de tubería, ya que los fluidos no tienen que recorrer grandes distancias hasta la central, reduciéndose a la vez las pérdidas de calor y por consiguiente la condensación que suele crear muchos problemas en los flujos de la turbina.
- Pueden interconectarse a las redes de distribución, o suministrar las necesidades de energía eléctrica de una zona pequeña, minimizando a la vez los costos de transmisión.
- Permiten disponer de energía eléctrica durante toda la etapa de desarrollo de una central geotérmica.
- No requieren de energía eléctrica de respaldo (parásita), lo cual se refleja también de manera positiva en sus costos.
- No necesitan condensadores, sistema de enfriamiento, sistema de extracción de gases, etc., lo cual contribuye más que ningún otro concepto a que su costo por KW instalado sea bastante bajo.
- Bajo ciertas circunstancias puede resultar más económico instalar varias plantas de pocos MW que una gran central (por ejemplo, 11 unidades de 5 MW en vez de una central de 55 MW).

\*\* Estas representan aproximadamente el 5% del total de la energía producida. (Tomado de GUIZA, Ezkauriatza Alejandro D., Manual - Preliminar para la Instalación de Plantas Geotérmicas a - Boca de Pozo (1986)).

- Pueden instalarse y desinstalarse rápida y económicamente.
- Contribuyen a no afectar la balanza de pagos ya que su grado de integración (para los países en desarrollo) puede ser cercano a un 80% y no resulta muy difícil lograr la total integración; a diferencia de las grandes centrales cuyo grado de integración suele ser bastante menor debido a lo sofisticado de los equipos que requiere.
- Sirven como base para el entrenamiento del personal que posteriormente podría operar una gran central.
- Sus factores de planta son bastante altos, variando de un 80 a un 95%.
- Se reducen de manera considerable los trabajos de ingeniería y de construcción.
- Se reduce la necesidad de mantenimiento y del personal necesario para ello, además de no requerirse personal altamente calificado.
- Si se dispara una unidad solo se deja de producir la de uno de los pozos y no se para la totalidad de la central, lo que hace más confiable a este tipo de sistema compuesto por muchas plantas de poca capacidad que a una gran central de capacidad equivalente.

- En los campos con alto contenido de gases, la explotación previa-  
por medio de este tipo de planta puede permitir bajar dicho conte-  
nido<sup>\*\*</sup>, favoreciendo al sistema al integrarse los pozos.<sup>\*\*\*</sup>
- Las fallas de operación, por mal funcionamiento de alguna protec-  
ción, por una mala estimación del contenido de gases,<sup>\*\*\*\*</sup> o por una-  
variación importante de los mismos durante la explotación, no a-  
fecta tanto a las plantas a boca de pozo, como a una gran central  
geotermoeléctrica.
- Su utilización resulta especialmente adecuada para regiones con --  
topografías muy accidentadas en las que la conducción del vapor es  
especialmente difícil (Hay que recordar que la mayor parte de los  
campos geotérmicos que se explotan en la actualidad en el mundo -  
son de medio ambiente volcánico, encontrándose generalmente en zo-  
nas montañosas o accidentadas).

<sup>\*\*</sup> El contenido de gases no solo crea problemas de corrosión, sino  
que también afecta la eficiencia de la turbina y, por ende, de  
la planta.

<sup>\*\*\*</sup> GUIZA, Ekauriatza Alejandro D.  
Manual Práctico Preliminar para la Instalación de Plantas Geo-  
termoeléctricas a Boca de Pozo.  
Tesis de Especialidad en Geotermia, Universidad Autónoma de Baja  
California. México, marzo de 1986.

<sup>\*\*\*\*</sup> Lo cual es muy difícil que pueda suceder, si se cuenta con los  
técnicos adecuados.

- En caso de abatirse la presión del yacimiento antes de lo previsto, puede quitárseles la primera rueda de álabes y operarse las plantas a una menor presión manteniendo la misma potencia, aunque bajando la eficiencia.

La incorporación a este tipo de planta de los separadores de turbina rotatoria (en lugar del Wabre o ciclónico), puede contribuir notablemente a hacer más atractiva la instalación de plantas a boca de pozo, ya que aumentan la eficiencia en un 25% respecto al sistema de flasheo simple, y un 7% con respecto al de doble flasheo, por lo que se disminuye el consumo específico de vapor (CEV). Por otra parte, el agua separada sale con una mayor presión por lo que se puede reinyectar ahorrándose las bombas reinectoras, además disminuye los problemas de incrustación por lo que es recomendable para salmueras con alto contenido de sales.\*\*

\*\* GUIZA, Ezkauriatza Alejandro D.  
Manual Preliminar, para la Instalación de Plantas Geotermoelectricas a Boca de Pozo.  
Tesis de Especialidad en Geotermia, Universidad Autónoma de Baja California. México, marzo de 1986.

Al parecer, las desventajas de este tipo de plantas parecen ser mucho menores que las ventajas, además de que muchas de ellas podrán eliminarse si se mejoran algunas de las técnicas que actualmente se utilizan. A saber, las desventajas son:

- Las plantas a boca de pozo tienen un consumo específico de vapor de entre un 20 a un 50% mayor que las centrales grandes, lo cual obliga a la necesidad de contar con un mayor número de plantas a contrapresión para poder generar la misma potencia.\*\*
- Debido a que el vapor entra a la turbina directamente no ha recorrido una distancia suficiente para provocar una ligera condensación, los sólidos son transportados por el vapor ocasionando problemas de incrustación en las dos primeras etapas de la turbina.
- No puede utilizarse todo el flujo geotérmico proveniente de un pozo por lo que, en el caso de pozos de gran producción, se pueden desperdiciar cantidades significativas de mezcla, sobre todo si no se pueden utilizar para alimentar otra turbina. Además, si un pozo no alcanza a producir los MW requeridos por la planta instalada, deberán interconectarse 2 o más pozos para poder alimentar la (derrateo), lo cual aumenta los costos. Esto obliga a que para que este aprovechamiento resulte adecuado, se requieran pozos con producciones en el rango de las 60 ton/hr de vapor separado - para plantas de 5 MW.

\*\* Para poder comparar correctamente el CEV de las plantas a contrapresión con el de las grandes centrales con condensador, deberá tomarse en cuenta la altura sobre el nivel del mar a la que se encuentran, ya que a mayor altura será menor la presión de escape para el vapor, con lo que se mejora la eficiencia del ciclo.

- Resultan vulnerables a rayos y a fallas de transmisión debido al exceso de líneas que requiere su utilización, y aunque es cierto que eso puede evitarse a través de líneas subterráneas, también es claro que estas son más caras. Además el exceso de líneas — contribuye a una contaminación visual del ambiente y en zonas con gran contenido de fauna aérea podrían representar un problema.
- No se puede tener un control de los gases incondensables y/o tóxicos, debido a que se descargan directamente a la atmósfera.

La utilización de las plantas a contrapresión a boca de pozo con líquido dominante, debe analizarse y compararse con la de las grandes centrales, siempre que se pretenda desarrollar un proyecto geotérmico, por resultar sumamente atractiva; ello sin descartar la posibilidad de una combinación de ambas opciones.

3) Plantas de Ciclo Binario: Estas plantas se denominan de ciclo binario debido a que utilizan un fluido de trabajo secundario (generalmente fluorocarbonos o hidrocarbonos) en un ciclo Rankine, con el fluido geotérmico sirviendo como fuente de energía térmica necesaria para evaporar y sobrecalentar el fluido secundario de trabajo.

Esto es, se realiza un transferencia de la energía calorífica contenida en la salmuera geotérmica a un fluido de trabajo que generalmente es un compuesto orgánico.

Este ciclo es especialmente adecuado para producir electricidad con fluidos geotérmicos de baja temperatura (entre 80 y 150 °C), que no resultan costosos para la producción de electricidad por medio del flasho, debido entre otras razones, al elevado volumen específico del vapor abajo de los 150-180 °C y a las bajas eficiencias que resultan; de ahí la utilización de otros fluidos con puntos de ebullición inferiores a los del agua, como fluidos de trabajo.

En la actualidad existen 7 plantas de ciclo binario operando comercialmente en los E.U.A., con una capacidad instalada de 65 MW, y 4 plantas en China con menos de 1 MW. Algunas pequeñas plantas piloto se están probando también en Japón y la URSS.\*\*

Resulta particularmente interesante la planta de Heber en los Estados Unidos, que utiliza una mezcla de isobutano-isopentano como fluido de trabajo, con una salida neta de 45 MW<sub>o</sub> y un factor de planta de 0.75.

\*\* HOCHSTEIN, M.P.  
Small Geothermal Power Schemes.  
En: Newsletter., UNITAR/UNDP, Centre on Small Energy Resources.  
Issue No. 3, may 1986.

Al hablar de ciclo binario es conveniente mencionar que -- aunque termodinámicamente resulta superior al sistema de flasheo, pa ra temperaturas arriba de los 150-180 °C el sistema de flasheo resul ta mejor debido a ser más económico. Las ventajas del ciclo bina- rio son:

- Es más apropiado para recursos geotérmicos hidrotermales de baja temperatura.
- Requiere de turbinas de menor tamaño, para una potencia dada, que el sistema de flasheo, además de resultar más económicas.
- No utiliza fluidos de trabajo corrosivos en la turbina, por lo -- que se eliminan los problemas de corrosión.
- Eficiencias isoentrópicas de la turbina más altas.
- Las temperaturas de condensado pueden ser menores para mejor eficiencia del ciclo.

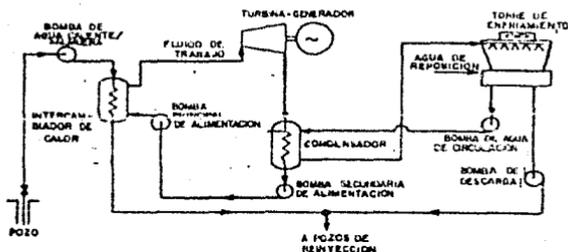
Sus desventajas son:

- Los fluidos secundarios de trabajo más apropiados son caros (de ahí que la elección de los mismos sea factor fundamental en el de sarrollo de plantas de ciclo binario).
- No puede permitirse ningún tipo de fugas.
- Los intercambiadores de calor son la parte esencial de estas plan tas y son muy costosos.

- Se necesitan flujos enormes de salmueras geotérmicas para poderse instalar tamaños razonables de planta.
- Los fluidos de trabajo más usados son inflamables y contaminantes, por lo que se requieren dispositivos de protección y control que encarecen la planta.

En la figura III.10 se muestra una planta de ciclo binario.

FIGURA III.10) ESQUEMA TÍPICO DE UNA PLANTA DE CICLO BINARIO.



Fuente: Geothermal Energy as a Source of Electricity. (1980).

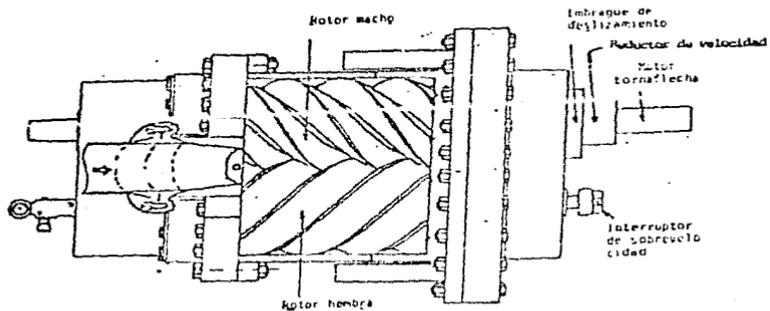
En la actualidad la mayor parte de las plantas de ciclo binario son a boca de pozo, debido a que todavía no se encuentran perfeccionadas; se espera, sin embargo, que a futuro se podrán construir plantas de gran tamaño por medio de este ciclo.

4) Plantas de Flujo Total: El sistema de flujo total es el concepto más simple de conversión de energía para fluidos geotérmicos - con líquido dominante. En este sistema se permite una expansión directa de la totalidad del flujo de dos fases (agua-vapor) proveniente de los pozos, aunque para ello se requiere de maquinarias eficientes y confiables que sean capaces de resistir la erosión y corrosión provocadas por los fluidos que vienen directamente de los pozos.

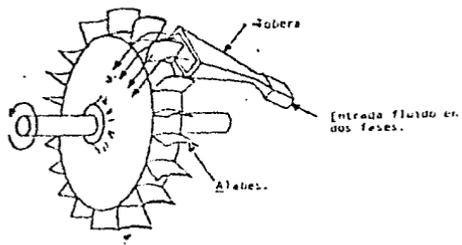
Su ventaja teórica deriva de la eliminación de las pérdidas asociadas con el flasheo o separación que se efectúa en la mayoría de las plantas geotérmicas convencionales.

Actualmente existen diversas plantas a boca de pozo de este tipo, a nivel experimental, en varias partes del mundo, pudiéndose dividir en dos grandes grupos básicos: Las que utilizan máquinas de desplazamiento positivo (la más utilizada es el expansor de tornillos helicoidales); y las que utilizan máquinas de impulso (siendo - la turbina de flujo axial la más utilizada). En la figura III.11 - se muestran esquemáticamente este tipo de máquinas.

FIGURA III.11) PRINCIPALES TIPOS DE MAQUINAS DE FLUJO TOTAL.



Expansor de tornillos helicoidales



Turbina de impulso de flujo axial.



6) Plantas Híbridas (fósiles/geotérmicas): Estas plantas combinarán la energía contenida en los combustibles fósiles con la energía geotérmica, aprovechando las características de ambos, y mejorando a la vez su utilización, eficiencia y flexibilidad.

Se han propuesto y analizado las características termodinámicas de diferentes tipos de plantas híbridas, cayendo casi todas -- las propuestas dentro de dos categorías: Sistemas geotérmicos precalentados en los que se precalienta el agua de las cauderas con energía geotérmica, haciéndola hervir posteriormente con combustibles fósiles para después introducirla a las turbinas; y sistemas fósiles supercalentados, en los que se utiliza la energía proveniente de los combustibles para sobrecalentar el vapor geotérmico y posteriormente introducirlo a las turbinas.

B) Determinación Exacta de la Capacidad de Generación: A este nivel deberá determinarse ya de manera precisa cual habrá de ser la capacidad a instalarse. Para ello deberá tomarse en cuenta tanto la demanda de los usuarios como la capacidad o potencial del campo y -- los pronósticos de abatimiento del mismo, teniendo en cuenta que los dos últimos son muy difíciles de estimarse correctamente con el actual desarrollo de la geotermia.

C) Selección del Sistema de Transporte de Fluidos: La mejor opción para el transporte de fluidos es aquella que permita el valor -- más bajo del costo de generación, sin sacrificar la confiabilidad.

Los parámetros más importantes a considerarse para esta elección son: El tipo de fluido del yacimiento; la curva de declinación con el tiempo de la presión y temperatura del yacimiento; las características químicas e incrustantes de los fluidos a diferentes presiones, temperaturas, velocidades, etc.; la presión de admisión - clogia, los costos de inversión, operación y mantenimiento de las tuberías, además de su aislamiento térmico; y características y composición química de los gases incondensables contenidos.

Existen tres sistemas básicos de transporte de los fluidos geotérmicos, estos son:

i) Transporte en una Fase: Aquí existen dos variaciones; cuando el fluido es vapor dominante, se envía directamente del pozo a la planta; y cuando el fluido es una mezcla agua-vapor, se separan las fases en las instalaciones de plataforma de los pozos y posteriormente se envía a la planta el vapor separado. Este sistema de transporte tiene las siguientes ventajas: Permite calcular los diámetros y caídas de presión por medios convencionales; se puede purgar el vapor con lo que se elimina el condensado y las sales remanentes del proceso de separación, lo cual se refleja en una menor necesidad de mantenimiento de la turbina; su operación es sencilla y en caso de incrustaciones en la tubería del agua, puede seguirse enviando vapor a la planta.

Sus desventajas son: Mayor costo de inversión, red de tuberías más complicada y mayores costos de operación y mantenimiento de la misma, mayores costos de ingeniería debido a la necesidad de análisis de flexibilidad y de soportería de las tuberías.

ii) Transporte de Mezcla: En este caso la mezcla agua-vapor no se separa en plataforma, sino que se conduce a la planta o un lugar intermedio donde se hace la separación. Sus ventajas son: Un menor costo de inversión al no requerirse separador en cada pozo, ni dos tuberías por pozo; menor red de tuberías y operación más simple de la misma; mayor espacio para reparación en los pozos por no requerirse instalaciones en la plataforma de cada pozo.

Las desventajas son: Cálculo más complicado de los diámetros y caídas de presión, además que en caso de presentarse cambios en la calidad de las mezclas, puede afectarse la capacidad de la tubería; mayor daño por depósitos en las primeras etapas de la turbina, debido a que la separación se hace en las proximidades de la planta, lo que obliga a paros para limpieza; mayor ocurrencia de flujos pulsantes que provocan movimientos periódicos en algunas partes de la tubería, lo que puede ocasionar fallas por fatiga de los materiales; mayor dificultad para realizar las mediciones periódicas de producción de cada pozo; y soportería de tubería más robusta debido al peso de la mezcla.

iii) Transporte Combinado: En este sistema se utilizan tanto tuberías para vapor como tuberías para agua, a fin de optimizar termodinámicamente el aprovechamiento de la energía contenida en los fluidos geotérmicos. Se realizan evaporizaciones tanto en la boca de pozo, como en los puntos próximos a la planta. Sus características son una combinación de los otros dos sistemas.

Otros puntos que deben considerarse dentro del sistema de transporte de fluidos son el transporte de agua para reinyección y el de gases incondensables. El primer caso deberá hacerse solamente cuando se haya probado la factibilidad técnica-económica de la reinyección, y deberá determinarse si esto se hará con un tratamiento previo, o no, de los fluidos.

El transporte de gases se hace a través de tuberías, y es recomendable el uso de tuberías de resinas químicas reforzadas con fibra de vidrio,\*\* a fin de poder transportar los gases incondensables fuera del área de la planta y descargarlos a la atmósfera.\*\*\*

\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica.  
III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica.  
GLADE-CFE, 1980.

\*\*\* En la actualidad los gases incondensables de la gran mayoría de campos geotérmicos del mundo se descargan a la atmósfera, única mente en el campo de Los Geysers en los Estados Unidos, y debido a las altas restricciones ambientales, se tratan estos a fin de obtener azufre de los mismos, en una planta de tratamiento ane xa a la planta geotermoelectrica. A futuro, la recuperación de algunos elementos y compuestos como azufre, ácido sulfúrico, sulfuro de sodio, y  $CO_2$ , entre otros de los gases incondensa bles, podría ser un factor más a favor de la geotermia. (Infor mación proporcionada al autor por el Ing. Sergio Mercado Gonzá lez, investigador en el área geotérmica del Instituto de Investi gaciones Eléctricas).

D) Selección de la Presión de Transporte y Admisión de los Fluidos Geotérmicos.

Debido a que la presión máxima de salida de cada uno de los pozos es diferente, deberá escogerse una presión óptima económica para realizar la transmisión de los fluidos, la cual generalmente será distinta de la presión óptima máxima, y a su vez dependerá de la presión deseada de entrada a la turbinas.

Esta variación entre la presión óptima económica y la presión óptima máxima estará en función de varias consideraciones, ya que, por un lado, la utilización de una presión mayor a la óptima máxima (y por ende de una mayor densidad del vapor) disminuirá los costos de tuberías y turbinas, por el otro la utilización de una presión menor puede permitir, en ciertos casos, el uso de algunos pozos de baja presión, que tendrían que abandonarse en caso de optarse por la primera opción. Generalmente la presión óptima económica será mayor que la presión óptima máxima\*\*, y deberá determinarse tratando de lograr la máxima potencia en la planta, tomando en cuenta para ello la producción y características individuales de cada pozo, su duración de vida, la escala a que se producirá, y la relación entre las condiciones del vapor y la máxima descarga permisible.

\*\* ARMSTEAD H. Cristopher H.  
Geothermal Economics.  
 En: Geothermal Energy, (del mismo autor). 1977

E) Selección del Sitio de la Planta: Generalmente en esta etapa -- suele realizarse la localización definitiva de la planta, en base a -- diversos factores como:

- Características particulares de la zona como lluvia, calor, geohidrología, geología, topografía, meteorología, medio ambiente vegetal y animal, sismicidad\*\*, mecánica de suelos, etc., tomando las -- medidas pertinentes a fin de mitigar cualquier condición adversa.
- Localización de los pozos.\*\*
- Disponibilidad de agua.
- Ruta seguida por las líneas de tuberías del pozo a la planta.
- Ruta de las líneas de desechos y drenajes de la planta.
- Contaminación ambiental.
- Factores socio-políticos.
- Intercomunicación de la zona con los sistemas de distribución de -- energía eléctrica ya existentes.
- Planes de expansión.

\*\* Aunque se han registrado movimientos de asentamiento del terreno después de la explotación exhaustiva de muchos acuíferos y campos petroleros (un ejemplo de ello lo representan las ciudades de México, y Long Beach en California), el único efecto similar reportado en un campo geotérmico es el de Wairakei en Nueva Zelanda, -- que ha sido poco significativo, ya que aunque ha afectado tuberías y algunos canales de drenaje, nunca ha puesto en peligro a la planta. [Bolton, 1977]

\*\*\* Es necesario que la planta se localice cerca de los pozos de producción, ya que la energía geotérmica solo puede transportarse -- económicamente en distancias no mayores de uno o dos kilómetros. De hecho, muchas plantas geotérmicas del mundo tienen altos costos de inversión debido al alto precio de las tuberías de conducción.

F) Tamaño de la Planta: La definición de su tamaño es muy importante ya que afectará de manera considerable en el costo del proyecto; para su elección deberá tenerse en cuenta el tamaño que se pueda y resulta económico fabricar, la estandarización de los equipos y los períodos de mantenimiento y posibilidades de falla en los meses.

El criterio de prudencia financiera aconseja escoger aquel tamaño que, dando lugar a una evaluación satisfactoria (no necesariamente la óptima), pueda financiarse con la mayor seguridad y cantidad posibles.

G) Arreglo General de la Planta (Lay-Out): Este punto resulta muy importante ya que contribuirá notablemente al adecuado desarrollo de las actividades dentro de la planta. Para la realización del lay-out puede dividirse a la planta en 4 sistemas principales, que son: Sistema de recolección de vapor; turbina-generador y sus accesorios, incluyendo el condensador; sistema de enfriamiento, incluyendo la torre de enfriamiento; y equipos eléctricos, incluyendo la subestación. Los factores más importantes que deben considerarse son: las facilidades de operación, facilidades de mantenimiento, viabilidad dentro de la planta, seguridad, economía, estética, y tipo particular de los equipos más importantes que vayan a utilizarse, como el tipo de condensador o el tipo de torre de enfriamiento.

Es conveniente que en este punto se realicen planos donde se muestre de manera adecuada la distribución de los equipos, los cuales suelen ser más sencillos que los de las plantas de combustibles fósiles, debido a que no existen calderas, y otros equipos auxiliares como ventiladores, chimeneas, etc.

H) Diagramas Elementales del Sistema (Unifilares). Estos deben - mostrar, de manera sencilla, la forma en que se conectarán las unidades con el sistema de transmisión de energía eléctrica, indicando - además el equipo principal con sus sistemas de control y protección.

I) Diagramas Elementales de la Planta (Unifilares). Estos diagramas definen, de forma resumida, como operará la planta, y muestran la forma en que estarán conectadas las unidades entre sí.

J) Diagramas Preliminares de Flujo. Para llevar a cabo la especificación de los equipos y sistemas auxiliares se necesita elaborar diagramas de flujo, que deberán mostrar el proceso de desarrollo, junto con los balances de materia y energía.

Estos diagramas pueden ser cualitativos o cuantitativos; - los primeros muestran las operaciones que se llevan a cabo, el equipo que se utiliza en las mismas e información básica sobre las condiciones de operación, además del flujo de materiales existente.

Los segundos muestran los consumos de materiales y materia prima (para el caso de vapor geotérmico), y los servicios auxiliares en cada operación (agua, energía eléctrica, calor, aire comprimido, refrigeración vacía, etc.)

Estos diagramas suelen contener en un principio únicamente la secuencia de las operaciones en el proceso; más adelante, conforme se avanza en el proyecto, se le van añadiendo datos cuantitativos que se van afinando progresivamente hasta incluir las especificaciones de los equipos lo cual se hace durante la etapa de la ingeniería de detalle. Es común acompañar los diagramas cuantitativos de tablas

con información detallada sobre las condiciones de operación o con las especificaciones de los equipos.

El diagrama de flujo principal de una planta geotérmica de be contener los siguientes puntos:

- Línea principal de vapor.
- Línea auxiliar de vapor.
- Línea de condensados y agua de enfriamiento.
- Línea de remoción de gases incondensables.
- Línea de agua caliente para reinyección.

K) Decisión de Usos Geotérmicos Alternos: Al desarrollar proyectos geotérmicos deberá preverse la utilización de la energía geotérmica en otros usos, como son los de Lija entálpica y la obtención de minerales de las salmueras geotérmicas; estos usos, aunque aumentan el grado de dificultad y la complejidad de los proyectos, permiten una explotación más racional y eficiente del recurso.

L) Determinación del Sistema de Evacuación de los Fluidos de Desecho: Dependiendo de la decisión tomada en el punto anterior, deberá determinarse de manera precisa, que es lo que habrá de hacerse con dichos fluidos, esto es, si se arrojarán a la atmósfera, mar o ríos caudalosos; se reinyectarán; se mandarán a alguna laguna de evaporación; o se utilizarán en los usos geotérmicos alternos anteriormente mencionados.

Las descargas de aguas geotérmicas en ríos caudalosos o -- mares, se considera una alternativa aceptable aunque con limitaciones de expansión, y requiere de estudios a fin de verificar que no se afectará sesiblemente el área de descarga.

Las lagunas de evaporación son recomendables cuando existen altos índices de evaporación y cuando se pretende extraer minerales de la salmuera.

Por lo que respecta a las ventajas de la reinyección se sugiere consultar el capítulo IX.4.

De hecho, la selección del sistema de evacuación de los desechos dependerá de las características particulares de cada caso.

M) Protección al Medio Ambiente: Deberá determinarse el grado de protección que habrá de darse al medio ambiente, especificándose los límites máximos permisibles de ruido; y de contaminación de la atmósfera, agua y suelo.

N) Grado de Automatización de la Planta: Se deberá estipular si la planta será controlada por medio de dispositivos sencillos, con mucho personal, o se automatizará en su totalidad, lo cual si bien puede hacer más eficiente y seguro el control, también es más sensible a cierto tipo de fallas, como las de suministro eléctrico, además de que resulta más caro. Por otro lado, deberán determinarse el tipo de señalamientos e instrumentaciones que se utilizarán en el sistema de control, y los accesorios que se requerirán (diseño conceptual).

O) Datos Eléctricos: Deberán definirse algunos conceptos básicos como la frecuencia a utilizar; y los voltajes a la salida del generador, de las líneas de transmisión, y de los auxiliares.

P) Información Preliminar de los Fabricantes: Esta proporcionará una idea de los equipos disponibles en el mercado, su costo, y de la experiencia y capacidad de producción de los fabricantes.

Q) Otros Aspectos Importantes: Algunos otros puntos importantes que deben considerarse son, entre otros, presión en el condensador; tipo de enfriamiento del generador; selección de los medios de enfriamiento (torre de enfriamiento, bombas, tuberías, etc.); selección del extractor de gas; dimensiones del silenciador, que dependerán básicamente de los siguientes parámetros, caudal, características del fluido, factores ambientales y factores económicos.

Deberán definirse también algunos criterios necesarios para el diseño como el número y capacidad de los equipos auxiliares; factores de seguridad en tuberías, equipo, cables eléctricos, etc.; sistemas de aire acondicionado, ventilación, etc.; niveles de alumbrado; tipos de aislamientos; códigos de colores para equipos y tuberías; procedimientos de soldaduras, soplado y limpieza de tuberías; detalles para estructuras; etc.

Otros criterios importantes para optimizar el proyecto son:\*\*

- El costo de la tubería sufre un incremento casi lineal con respecto al aumento del diámetro.
- La capacidad de transporte de energía se incrementa con el cuadrado del diámetro de la tubería.
- El costo del transporte de fluidos geotérmicos decrece en razón inversa a la temperatura.
- Las pérdidas de energía se incrementan conforme aumenta la diferencia de temperaturas entre los fluidos y el medio ambiente.

\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica.  
III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica.  
OIADE-CPE, 1980

- La distancia incrementa de forma lineal los costos.
- Las pérdidas de energía son proporcionales a la relación del área superficial y el volumen del tubo por unidad de longitud.

R) Programación de la Construcción, Instalación y Puesta en Servicio de la Planta: Esta tiene por objeto:

- 1) Sincronizar de la mejor manera posible las actividades correspondientes, de tal manera que se aprovechen al máximo el tiempo y los recursos materiales, humanos y económicos, previendo las actividades que se pueden efectuar simultáneamente y las que por ser consecutivas requieren la terminación de la actividad inmediata anterior.
- 2) Establecer el programa de inversiones que servirá de base para financiar oportunamente las diversas fases de la realización del proyecto. La cuantificación se puede realizar en base a costos de anteriores proyectos, precios preliminares obtenidos de los fabricantes y experiencia del personal.
- 3) Estimar el tiempo requerido para construir, instalar y poner en marcha la planta y sincronizar el inicio de operaciones.
- 4) Prever los problemas que pudieran surgir al desarrollar el proyecto y tomar las medidas oportunas y necesarias para resolverlos.
- 5) Permitir que se obtenga la mayor continuidad posible entre la etapa de instalación y la de operación normal de la planta.

Deberá realizarse un Programa de Conceptos principales, y posteriormente el Programa de Fechas Clave, que incluirán (aunque el segundo con mayor detalle), los conceptos trascendentales para el buen desarrollo del proyecto y que deberá tratar de seguirse lo más fielmente posible.

Generalmente suele realizarse después un Programa General de Construcción, el cual tiene como funciones principales servir de guía para la planeación y coordinación de las actividades de construcción; además de servir también como medio de comunicación con las áreas de ingeniería, abastecimientos y puesta en servicio.

Este programa contiene un desglose de las principales actividades de construcción y puesta en servicio y es conveniente que contenga asimismo un presupuesto preliminar del proyecto, que deberá realizarse cuando la ingeniería tenga un avance de un 1 a un 5%.\*\*

Por su naturaleza propia, este tipo de programa incluye pocos conceptos, aunque más que el programa de conceptos principales y el de fechas clave.

Posteriormente deberá realizarse el Programa Intermedio de Construcción, que debe incluir en forma resumida las principales actividades del proyecto en las áreas de ingeniería, construcción, abastecimientos y puesta en servicio. Este es un programa más completo, con un mayor número de conceptos, y es recomendable que se realice cuando la ingeniería tenga un avance de un 10 a un 25%.\*\*\* Al igual que el programa anterior, este incluye también un presupuesto que puede denominarse intermedio.

\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica.  
III Seminario sobre Desarrollo y Explotación geotérmica.  
CLADE-CPE, 1980.

\*\*\* Idem al anterior.

Para la presentación y determinación del programa para la realización del proyecto se pueden emplear técnicas de planeación y control de actividades como el Método de la Ruta Crítica (CPM), la Técnica de Evaluación y Revisión de Programas (PERT), y el Procedimiento de Asignación Múltiple de Recursos (MAP), entre otros. Estas técnicas pueden utilizarse de manera tradicional o incluirlas dentro de programas computacionales que las hacen más eficientes, rápidas y seguras.

Finalmente, por lo que respecta al empleo de la computadora durante la ingeniería básica, puede usarse para determinar la generación óptima en base al número y características de los pozos; las pérdidas de presión en la conducción de los fluidos geotérmicos; optimizar la presión de conducción y de entrada a la turbina de dichos fluidos; cálculos de mecánica de suelos y sismicidad como auxiliares en la localización de la planta; cálculo de los aislamientos térmicos; cálculo de la torre de enfriamiento, etc.

NOTA: Todos los incisos anteriores muestran los principales conceptos que deben realizarse durante la ingeniería básica, pero eso no implica que sean los únicos, ni que deban efectuarse en el orden aquí mencionado. Además, debe tomarse en cuenta que durante todo el proceso de realización de la ingeniería y en cada una de sus disciplinas se realizan operaciones de retroalimentación, ya que los resultados de unas actividades sirven para orientar las subsecuentes, y los resultados de estas últimas sirven para tomar decisiones respecto a las primeras.

## XI.2) Evaluación Económica.

Es lógico que para que un proyecto tenga razón de ser debe estar justificado desde el punto de vista empresarial o social, esto es, deberá mostrarse la posibilidad de obtener una rentabilidad atractiva -- que pueda justificar la utilización de recursos en el mismo; o en el caso contrario, deberán justificarse claramente los beneficios sociales -- que se obtendrán del proyecto, contra los costos de inversión y operación del mismo (esto último es tema del siguiente capítulo).

En general, la evaluación económica de un proyecto consistirá en verificar que este se encuentre totalmente definido y que todas las decisiones adaptadas con respecto a las características básicas del mismo estén bien fundamentadas.

Como en cualquier proyecto, la realización de uno de tipo geométri-co lleva implícito un riesgo, mismo que deberá evaluarse también con mucho cuidado.

Al análisis económico proporciona información esencial, la cual tiene un gran efecto en la toma de decisiones, por lo que es muy importante hacer la separación entre análisis y decisión. Esto es, el análisis económico es una ayuda para la toma de decisiones y no un sustituto de la misma.

Todo proyecto geotérmico deberá ser competitivo con otras fuentes convencionales de energía, lo cual requiere de un adecuado sistema de control de costos en las diferentes fases del proyecto, cuidando siempre de obtener el correcto equilibrio entre estos y la confiabilidad de operación del sistema geotérmico.

Por ello deberá realizarse una comparación económica entre las alternativas técnicamente factibles, en términos que sean realmente comparables. El concepto del valor del dinero a través del tiempo revela que los flujos de efectivo pueden ser trasladados a cantidades equivalentes en cualquier punto del tiempo, y existen tres métodos que comparan estas cantidades equivalentes:

- Método del Valor Anual Equivalente.
- Método del Valor Presente.
- Método de la Tasa Interna de Retorno o Rendimiento.

Estos métodos son equivalentes, esto es, si un proyecto de inversión se analiza correctamente con cada uno de estos métodos, la decisión recomendada será la misma. La decisión de cual método utilizar dependerá del problema que se vaya a analizar, de las preferencias del analista, y de cual método arroja los resultados de forma tal que sea fácilmente comprendida por las personas involucradas en el proceso de toma de decisiones.

La comparación antes mencionada puede hacerse tanto desde el punto de vista económico, como del financiero, y ambos parten de la base de que no hay inflación. (lo cual no influye mayormente en el análisis y sus resultados, ya que la inflación afecta por igual a los dos).

En el análisis económico en sí, la comparación se realiza sin tener en cuenta los intereses; mientras que en el análisis financiero se considera el costo que tiene obtener el dinero prestado.

En los países que, como México, los proyectos para la generación de electricidad, buscan satisfacer necesidades sociales, la comparación se hace sobre bases económicas; mientras que en los países, como los Estados Unidos, en donde los proyectos tienen un fin lucrativo, la comparación se hace sobre bases financieras.

Debe aclararse que al realizar estos análisis no necesariamente la opción más económica es la mejor (esto es especialmente cierto para los países en vías de desarrollo que cuentan con escasos recursos), ya que aunque, por ejemplo, una planta hidroeléctrica puede resultar la mejor opción, frecuentemente y por no contarse con los grandes recursos que se requieren para su inversión inicial, suele preferirse instalar una planta de baja inversión inicial (como una termoeléctrica) a pesar de que posteriormente se tendrán que hacer erogaciones anuales en combustible que a la larga la convertirán en una opción más cara.

Para llevar a cabo la materialización de un proyecto geotérmico, como la de cualquier otro proyecto, se requiere asignarle una cantidad de recursos que se pueden agrupar en dos grandes grupos: Los que se requieren para la adquisición e instalación de la planta, y los requeridos para su operación.

Los primeros constituyen la inversión fija del proyecto -- (para el caso los costos de inversión), y los segundos son los costos de generación (costos de operación, mantenimiento y reposición de pozos, tuberías y equipos superficiales).

A continuación, y sin entrar en detalle por estar fuera de los alcances del presente trabajo, se presenta una metodología para realizar la evaluación económica de un proyecto geotérmico.

Aunque los costos de inversión de un proyecto geotérmico -- se pueden agrupar de muy diversas maneras, para efectos prácticos resulta adecuado dividirlos en los siguientes rubros:\*\*

- Exploración.
- Pozos e Instalaciones Superficiales.
- Sistema de Transporte y Evacuación de Fluidos.
- Planta.
- Líneas de Transmisión.

\*\* Se está suponiendo el caso en que un mismo organismo se encarga -- tanto de la explotación del campo, como de la comercialización y -- venta de la energía eléctrica. Aún así, el costo de inversión -- de las líneas de transmisión podría cargarse a otra cuenta (tal y como se hace en el caso de México).

En base a los costos de todos estos conceptos y dividiéndolos entre la capacidad de la planta, se obtiene el costo por KW - instalado que es uno de los parámetros fundamentales de comparación económica de proyectos.

Posteriormente deberán obtenerse los gastos fijos anuales por concepto de inversión, los cuales están constituidos por el costo anual del capital y el costo anual por depreciación. A su vez, el costo anual del capital se determina a partir del costo neto de la inversión y los intereses generados durante la construcción, desde su inicio hasta la puesta en marcha de la planta, mientras que el costo anual por depreciación deberá calcularse según los criterios establecidos en cada país, aunque suele ser común calcularlo por depreciación en línea recta.\*\*

Una vez obtenido el gasto fijo anual por concepto de inversión, deberán calcularse los gastos anuales por concepto de operación y mantenimiento de central, campo y reposición de pozos, tuberías y equipos superficiales, los cuales se obtienen en base a la experiencia estadística de otros proyectos similares y al estudio del proyecto en particular.

Posteriormente, deberán equipararse en el tiempo, por alguno de los métodos de análisis económico mencionados anteriormente, todos los flujos de efectivo generados (gasto fijo anual de inver -

\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica.  
III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica.  
OLADE-CFE, 1980.

ción y gastos fijos anuales de operación, mantenimiento y reposición), y sumarse, para poder obtener así el costo total del proyecto.

Finalmente se divide este último concepto entre la generación total de energía, poniendo esta en términos del método de análisis que se haya utilizado, obteniéndose el costo unitario de generación, esto es, el costo por KWH generado.

Quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$\text{C.U.G.} = \frac{\text{Flujos de efectivo X factor de comparación (1)**}}{\text{Generación X factor de comparación (2)}}$$

Para el lector interesado en el tema se sugiere consultar la Metodología de Desarrollo y Explotación Geotérmica de la OLADE-CFE y el documento intitulado Alternativas de Desarrollo en Campos Geotérmicos del In.g Michel E. Giacobello, donde se trata el tema con bastante mayor detalle y se exponen algunos ejemplos de cálculos -- muy interesantes, a través de diferentes metodologías (anualidad -- equivalente y valor presente respectivamente).

\*\* El factor de comparación dependerá del método que se utilice -- (valor presente, anualidad equivalente, o tasa interna de retorno), y en general el factor del numerador será diferente del factor en el denominador por involucrar cada uno tiempos distintos.

Una vez calculados el costo por KW instalado y el costo - por KWH, deberá realizarse un análisis de sensibilidad a fin de poder estimar lo que puede pasar en el proyecto en caso de que no todo saliera tal y como se había previsto.

Existen un sinnúmero de parámetros que se pueden variar - al realizar este análisis, siendo algunos de los más importantes: El de la tasa de descuento (que es la ganancia neta que se hubiera obtenido durante un año, si el dinero invertido en el proyecto se - hubiese invertido en alguna industria o comercio); la vida útil del proyecto, para determinar que sucedería en caso de que el proyecto - no fuera tan durable como se preveía; y el calendario de inversiones, para estimar los efectos al proyecto en el caso de que las erogaciones no se realizaran en los tiempos previamente estipulados.

Otro punto muy importante de determinar al realizar una - evaluación económica es el del gasto de abandono\*\*, que es el gasto - hasta el que conviene todavía, desde el punto de vista económico, - seguir produciendo electricidad a partir del vapor endógeno. Esto es muy importante ya que cuando existen abatimientos considerables - en un campo, puede llegarse el caso de que ya no convenga seguir -- produciendo electricidad a través de la energía geotérmica, y con - venga más hacerlo por otra fuente de energía.\*\*\*

\*\* Algunos autores se inclinan más por hablar de una presión de abandono, probar cual de los dos conceptos es mejor sale de los límites del presente trabajo, y el autor no conoce ningún documento en que se haga una comparación entre estos dos puntos.

\*\*\* Información proporcionada al autor por el DR. Ferruccio Jarach del Departamento de Geotermia de la compañía italiana ELC Elec troconsult, durante una entrevista personal.

Por lo que respecta al análisis de riesgo, este deberá realizarse siempre al desarrollar un proyecto geotermoelectrónico, ya que durante el mismo se toman muchas decisiones cada año, aunque simplificando -y tipificando-, se puede decir que las tres más importantes (desde el punto de vista económico) son:

- Decisión 1: Se deciden perforar los pozos exploratorios.
- Decisión 2: Se deciden perforar los pozos de producción.
- Decisión 3: Se decide comprar e instalar una central.

En el caso de que existiera un error o falla en la decisión tomada, esto traería las siguientes consecuencias:

- 1.- Si se deciden perforar los pozos exploratorios y estos fallan, el proyecto deberá detenerse (al finalizar los pozos), perdiéndose lo invertido.
- 2.- Si se deciden perforar los pozos productores y estos resultaran fallidos, el proyecto deberá también detenerse (al finalizar dichos pozos), con lo que se perderá asimismo lo invertido.
- 3.- Si se decide comprar e instalar una central (teniendo ya un cierto porcentaje de vapor en la superficie), y los pozos restantes no son capaces de dar la cantidad de vapor restante necesaria, pueden ocurrir tres casos:

a) Que solo se genere un porcentaje de lo estipulado inicialmente, debido a la falta de vapor, con lo que el costo por kWh se verá incrementado.

b) Se necesitarán aumentar el número de pozos productores, a fin de poder producir lo estimado al principio, con lo que el costo del kWh también se incrementará.

c) Abandonar el proyecto por falta de suficiente vapor y venderlo a precio castigado.

En todos los casos, deberá hacerse una evaluación numérica a fin de poder determinar cuanto podría perderse en cada una de las opciones.

Existen otros riesgos importantes que también conviene evaluarlos como son, entre otros, que el yacimiento dure menos de lo esperado, que se requieran más pozos de los estimados, o que el factor de planta sea menor al calculado.

Las probabilidades de fallar en las decisiones, dependerán del conocimiento del yacimiento que se tenga antes de tomar la decisión, y del grado de complejidad del mismo. El riesgo puede disminuirse, aunque generalmente será a costa del encarecimiento de la energía generada.

### XI.3) Evaluación Socioeconómica.

Debido a que la realización de cualquier proyecto (y sobre todo de los de gran envergadura), influirá determinadamente en diversos aspectos de la sociedad, es necesario que se realice una evaluación socioeconómica a fin de determinar si los beneficios esperados - del mismo justifican el empleo de los recursos que serán necesarios - para la realización y operación de proyecto; particularmente esta evaluación se realiza con el fin de justificar la utilización de recursos escasos (capital, mano de obra calificada, recursos naturales, etc.) con prioridad sobre otro tipo de proyectos, procurando maximizar el aprovechamiento de dichos recursos escasos.

Esta evaluación puede realizarse desde el punto de vista del inversionista privado (que analiza los costos y beneficios directos - del proyecto), y desde el punto de vista social, el cual además de -- contemplar los costos y beneficios directos toma en cuenta también los costos y beneficios indirectos; esto es, el objetivo no es únicamente obtener una rentabilidad comercial, sino que se persiguen otros objetivos como la planificación nacional y el bienestar de la sociedad como un todo (enfoque sistémico).

Debido a la complejidad de este tipo de evaluación, solo -- suele realizarse en proyectos de gran magnitud.

Algunos de los efectos indirectos del proyecto que deben de tomarse en cuenta al realizar una evaluación socioeconómica son:

- Efecto sobre el producto nacional.
- Efecto sobre la balanza de pagos (Debido a que la importación de equipos muy caros o en grandes cantidades podría afectarla sensiblemente).
- Generación de empleos.
- Aportación al desarrollo industrial y tecnológico.
- Creación al desarrollo industrial y tecnológico.
- Creación de infraestructura.
- Creación de coyunturas que permitan el desarrollo de otras industrias o empresas (Integración Horizontal).
- Valor agregado a las materias primas.
- Influencia en el desarrollo sectorial, regional, o nacional.
- Beneficios o afectación a la ecología, estética, etc.

Algunas herramientas auxiliares muy importantes para la realización de una evaluación socioeconómica son las cuentas nacionales, que son un registro contable de los sucesos de un país, y permiten conocer la estructura y forma en que está operando el mismo; y la matriz insumo-producto que muestra las relaciones existentes en los distintos sectores de la economía.

La evaluación socioeconómica se puede realizar mediante un coeficiente único o mediante la combinación de varios coeficientes parciales, todos ellos medidos a través de una unidad común de valuación que generalmente suele ser el dinero.

Otro punto importante que se debe determinar también durante este tipo de evaluación es el de la tasa de rendimiento o rentabilidad, como un índice de su justificación económica; pero se presenta el problema de que los beneficios y costos del proyecto no solo tienen precios de mercado, sino también precios sociales, los cuales son sumamente difíciles de cuantificar debido a que no cumplen con las leyes de la economía clásica, esto es, con la ley de la oferta y la demanda.

Otro problema importante que suele presentarse al realizar este tipo de evaluación es el riesgo que se corre de que lo que en un principio se haya clasificado como beneficio, pueda convertirse a la larga en un costo, o viceversa, por lo que se requiere de un análisis de sensibilidad o del auxilio de la teoría de probabilidades y de la estadística matemática a fin de valorizar dicho riesgo.

El método analítico más utilizado para hacer la evaluación socioeconómica es el de costo-beneficio, que en la actualidad tiene una muy amplia aceptación.

CAP XII) INGENIERIA DE DETALLE Y MANUFACTURA.

Aunque en teoría la ingeniería de detalle debe iniciarse - una vez terminada la ingeniería básica, se ha encontrado que es práctico y conveniente que exista un traslape entre las mismas.

Suele acostumbrarse en muchos países que la ingeniería de detalle (o diseño), sea realizada por una o varias firmas de ing  
ería, lo cual en general deberá depender de los costos que ello impli  
que y de la experiencia que tenga el responsable del proyecto.

Durante esta etapa se afinan algunos conceptos realizados durante la ingeniería básica, como la selección definitiva del sitio de la planta; y la realización a detalle de los diagramas del sistema de la planta, y de diagramas de flujo.

La ingeniería de detalle de una planta geotermoelectrica es sumamente compleja y abarca un sinnúmero de conceptos y acciones, además de que depende de las características particulares de cada campo. A continuación se muestran las principales actividades que deben realizarse en esta etapa, sin profundizar en cada una de ellas, por estar fuera de los límites del trabajo.

A) Selección de los Materiales: Debido a que, como se mencionó anteriormente, la turbina, los sistemas de conducción de los fluidos geotérmicos, y algunos equipos auxiliares están sujetos a los gases corrosivos contenidos en dichos fluidos, será necesario realizar una adecuada selección de los materiales con que se fabricarán esos equipos, lo cual incidirá de manera significativa en los costos de los mismos. En la tabla III.5 se muestra el uso de algunos materiales en equipos geotérmicos básicos.

B) Diseño del Turbogenerador: La elección del turbogenerador es vital, debido a la importancia que representa dentro de una planta geotérmica, y a lo elevado de sus costos.

El turbogenerador es el que permite convertir la energía térmica contenida en el vapor en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. Aunque sus costos pueden variar considerablemente de un país a otro (ya que algunos países tienen que importarlos), siempre representan una parte importante del valor total de la planta. En las plantas geotérmicas de 5 MW, por ejemplo, los turbogeneradores llegan a representar más del 70% del costo total\*\*.

Las características de diseño de un turbogenerador dependen, entre otras cosas, de la eficiencia deseada para convertir el vapor o la mezcla en energía útil, y de la cantidad y composición de los gases incondensables.

\*\* CADENAS, Tovar Roberto.  
Turbogeneradores Geotérmicos de 5 MW, Fabricación Nacional y Costos.  
XII Congreso Nacional Bienal del CIME.  
México, D.F., 4-7 de noviembre de 1986.

TABLA III.5) APLICACION DE LOS MATERIALES EN LOS EQUIPOS PRINCIPALES.

MATERIAL	PARTES Y/O EQUIPOS EN CONTACTO	FLUIDO DE CONTACTO	ENTORNO PROTECTORA
ACERO BOLAJO PARA LA ESTRUCTURA GENERAL.	SILENCIADORES, TURBINAS DE VAPOR, CD LECTORES, CÁMARA DE SALIDA DEL VAPOR DE LA TURBINA.	VAPOR	---
	TUBERÍA DE ESCAPE DEL VAPOR, CONDENSADOR (SIN REACCIONES DE AGUA).	VAPOR	EXÓXICA
	SEPARADORES DE NUBES PARA LOS EXTRACTORES DE GAS.	GAS	EXÓXICA
	NOCLADORES DE AGUA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO, ENFRÍANDES DE ACEITE (SIN TRABAJO).	AGUA O ACEITE	EXÓXICA
ACERO BOLAJO PARA ESTRUCTURAS SOLDADAS	CUERPO DE LOS SEPARADORES, CUERPO DE LAS VALVULAS CUERPO DE LOS SEPAR.	VAPOR	---
	TANQUES DE AGUA CALIENTE, TANQUES DE RESACA.	AGUA CALIENTE	---
HIERRO Gris FUNDIDO	DIAPHRAGMAS DE LA TURBINA, TUBERÍA DE DEPRESA A LA TURBINA, CÁMARA DE ENTRADA DEL VAPOR A LA TURBINA.	VAPOR	---
	EXTRACTORES DE GAS (SIN VALVULA DE AUMENTACIÓN)	GAS	---
	ENFRÍANDES DE LAS BOMBAS DE AGUA CALIENTE, ENFRÍANDES DE LAS BOMBAS DE AGUA FRIA, TUBERÍA PRINCIPAL DE AGUA.	AGUA	---
FUNDICIONES DE ACERO AL CARBÓN	TURBINAS DE VAPOR.	VAPOR	---
	TURBINAS DE AGUA CALIENTE. TURBINAS DE DESACACA Y DE EXTRACTORES DE GASES.	AGUA CALIENTE GAS	EXÓXICA
ACERO AL NÍQUEL 5%Ni	ROTOR DE TURBINA	VAPOR	---
ACERO INOXIDABLE	TURBINAS DE LA TURBINA, ALABES DE LA TURBINA, FILTROS DEL VAPOR PRINCIPAL, CÁMARA DE SELLO DE LA TURBINA.	VAPOR	---
	ESPEJOS DE LA VALVULA CHECK DE ESCADA JUNTAS DE EMBRACE, ELEMENTOS DEL SEPARADOR Y COLECCIONES.	---	---
	VALVULA DE ALIMENTACIÓN (DE PLATO) DEL EXTRACTOR DE GAS.	GAS	---
	RECCIONES DE AGUA DEL CONDENSADOR, FLECHAS DE LAS BOMBAS DE AGUA CALIENTE, Y DE LAS BOMBAS DE AGUA FRIA, TURBINAS DE AGUA DE ENFRIAMIENTO AGUILLAS, TUBO DE LOS EXTRACTORES DE ACEITE.	AGUA	---
	---	---	---
FUNDICIONES DE ACERO INOXIDABLE	EMBRACES DE LAS BOMBAS DE AGUA CALIENTE Y DE LAS BOMBAS DE AGUA FRIA.	AGUA	---
ALICACIONES ANTI-CORROSIVAS DE ALUMINIO	VANFANADORES DE LA TORRE DE ENFRÍANDES.	AIRE HUMEDO	---

Fuente: Geothermal Power Generation. Step 6.

Algunos de los puntos más importantes que deben considerarse al diseñar (o especificar)\*\* un turbogenerador son: Su configuración, que dependerá del tipo de aplicación que tendrá (contrapresión - o condensación) y de la potencia requerida; el arreglo de las tuberías de admisión del vapor a la turbina; el tipo y materiales de la carcasa; los materiales, construcción y resistencia del rotor y los álabes; las características de las válvulas de paro y control; el control del sistema a través de las válvulas de tipo mariposa; el vástago libre de la válvula principal de paro; y el sistema de purgas.

C) Diseño del Condensador: El condensador representa una parte muy importante en la mayoría de los campos geotérmicos, ya que es el que condensa el vapor que sale de la turbina, a fin de incrementar la eficiencia térmica del ciclo, para que una vez condensado pueda transportarse en forma de agua caliente a la torre de enfriamiento, donde se le baja la temperatura, para que posteriormente se recircule al mismo condensador o se reinyecte.

\*\* Generalmente el diseño y construcción de los equipos principales, que a su vez suelen ser los más caros, se da a compañías especializadas, por lo que los que desarrollan el campo solo tendrán que dar las especificaciones a las que deberán ajustarse los equipos - y no realizar la ingeniería en sí de los mismos.

Los puntos más importantes a considerar al diseñar un condensador son su tipo (de contacto directo o de superficie); su localización; y el contenido de gases del vapor, ya que el condensador - dependerá en gran manera del contenido y composición de los gases in condensables. Generalmente para campos geotérmicos con contenidos de gases de cerca del 10% ya no resulta económico la utilización de plantas con condensadores, siendo más conveniente el uso de plantas a contrapresión que no requieren ni condensador ni extractor de gases.

Al diseñarse el condensador debe tenerse cuidado en tratar de que los aumentos de presión (pérdidas de vacío) en el mismo sean - lo más pequeños posibles, ya que su aumento se refleja en la necesidad de extractores de gas de mayor volumen y, por ende, en los costos.

D) Diseño del Extractor de Gas: Como es lógico, su utilización de penderá del contenido promedio de gases, el cual es a la vez el parámetro principal de diseño de un extractor de gas.

Su selección resulta importante en campos con altos conteni dos de gases incondensables y corrosivos, ya que las ganancias de generación que puedan obtenerse por su uso deberán compensarse con el - costo del mismo. De hecho, en general el costo del vapor en campos con alto contenido de gases es más caro por KW neto.

En la mayoría de las termoeléctricas y geotermoeléctricas - del mundo se acostumbra usar eyectores para realizar la extracción de los gases, aunque en países como Japón en el que la compañía que perfora le vende el vapor a la compañía que se encarga de la producción de electricidad, estos últimos prefieren la utilización de bombas re-

ciprocantes, ya que son más eficientes y baratas además de necesitar se una menor cantidad de las mismas -por lo que compran menos vapor-, aunque tienen la desventaja de requerir un mayor tiempo en su mantenimiento, debido a lo complicado de su estructura.\*\*

Sin embargo, en campos de gran capacidad o con altos contenidos de gases tienen que utilizarse los eyectores debido a que las bombas reciprocantes se encuentran más limitadas que los eyectores -por su capacidad.

Un equipo complementario muy importante es el inter o post condensador (dependiendo en que etapa de la extracción se encuentre), que sirve para eliminar el vapor que se haya arrastrado con los gases y además es un auxiliar en la eliminación del ruido.

E) Diseño del Sistema de Agua de Enfriamiento: Los puntos más importantes que deben considerarse al diseñar este sistema son:

i) Torre de Enfriamiento: La torre de enfriamiento es un equipo básico de la mayoría de las plantas geotérmicas convencionales (exceptuando las plantas a contrapresión que no la requieren).

La adecuada selección de la torre de enfriamiento estará en función de factores como las condiciones meteorológicas (velocidad del viento, temperatura, etc.); condiciones geográficas; eficiencia económica; confiabilidad; y operacionalidad. En la tabla III.6 se muestran los diversos tipos existentes de torres de enfriamiento.

\*\* Geothermal Power Generation.  
Step 6, Mitsubishi Heavy Industrie.  
Tokyo, Japan. Publicado por el IIE en la referencia B626.

TABLA III.6) CLASIFICACION DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

METODO DE ENFRIAMIENTO	SISTEMA DE VENTILACION	DIRECCION DEL AIRE Y FLUJO DEL AGUA
TIPO SECO	TORRE DE ENFRIAMIENTO CON AIRE	VENTILACION FORZADA
	TORRE DE ENFRIAMIENTO CON REFRIGERANTE (SISTEMA HELLER)	{ VENTILACION FORZADA VENTILACION NATURAL
TIPO HUMEDO	TORRE DE ENFRIAMIENTO	VENTILACION NATURAL <ul style="list-style-type: none"> <li>← CONTRAFLUJO</li> <li>← FLUJO CRUZADO</li> </ul> VENTILACION FORZADA <ul style="list-style-type: none"> <li>← FLUJO PARALELO</li> <li>← CONTRAFLUJO</li> <li>← FLUJO CRUZADO</li> </ul>

Fuente: Geothermal Power Generation. Step. 6

TABLA III.6) CLASIFICACION DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

METODO DE ENFRIAMIENTO	SISTEMA DE VENTILACION	DIRECCION DEL AIRE Y FLUJO DEL AGUA
TIPO SECO	<ul style="list-style-type: none"> <li>TORRE DE ENFRIAMIENTO CON AIRE</li> <li>TORRE DE ENFRIAMIENTO CON REFRIGERANTE (SISTEMA HELLER)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>VENTILACION FORZADA</li> <li>VENTILACION FORZADA</li> <li>VENTILACION NATURAL</li> </ul>
TIPO HUMEDO	TORRE DE ENFRIAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> <li>VENTILACION NATURAL                             <ul style="list-style-type: none"> <li>CONTRAFLUJO</li> <li>FLUJO CRUZADO</li> </ul> </li> <li>VENTILACION FORZADA                             <ul style="list-style-type: none"> <li>FLUJO PARALELO</li> <li>CONTRAFLUJO</li> <li>FLUJO CRUZADO</li> </ul> </li> </ul>

Fuente: Geothermal Power Generation. Step. 6

Como la torre de enfriamiento juega un papel importante en la difusión de los gases geotérmicos, la estimación de los mismos es factor primordial para poder decidir el tipo de torre.<sup>\*\*</sup> Esto es, - el tipo de torre de enfriamiento estará también en función de la cantidad y tipo de los gases incondensables.

ii) Bombas de Agua Caliente: La función de estas bombas estriba en llevar el agua caliente (40-50 °C) que sale del condensador<sup>\*\*\*</sup> a la parte más alta de la torre de enfriamiento. El diseño del tipo de bomba a utilizar es muy importante ya que permitirá optimizar la eficiencia del sistema de agua de enfriamiento. Los dos tipos básicos de bomba son; las verticales y las horizontales.

iii) Sistema de Control del Nivel de Agua: En el debe incluirse el diseño del sistema de control tanto del condensador, como de la torre de enfriamiento. El sistema de control permite mantener el nivel adecuado de agua a fin de mantener la temperatura y el vacío de la misma dentro de los rangos deseados.

iv) Línea de Tuberías de Agua de Enfriamiento: Como la cantidad de vapor desechado por la turbina es muy grande, también lo es la cantidad de agua condensada para enfriamiento, por lo que se requiere la utilización de tuberías de gran diámetro. Además como se necesitan tuberías entre el condensador y la torre en ambos sentidos, se aumenta la distancia y con ello los costos en tuberías, de ahí la importancia del adecuado diseño de las mismas. Debido a que los condensados del vapor geotérmico son especialmente ácidos, debe tomarse mucho cuidado con el pH de los mismos a fin de evitar corrosiones excesivas en las tuberías.

\*\* De hecho, la extracción de gases se puede partir solubilizando parte en el condensado y sacándolo por las chimeneas de la torre de enfriamiento (hasta un 40%) y eliminando el resto (60%) con los extractores.

\*\*\* Cuando se trate de condensadores de contacto directo.

F) Diseño del Sistema de Recolección del Vapor. Los puntos más importantes a considerar al diseñar este sistema son:

i) Separador: En los campos de líquido dominante el separador es un equipo indispensable que permite separar las fases para posteriormente poder conducir las individualmente. El separador más común, - debido a su facilidad de operación y mantenimiento, es el de tipo ciclónico o Wehre, en el cual la separación se produce debido a la acción centrífuga resultante de la entrada tangencial del fluido. Como consecuencia de la diferencia de densidades entre el agua y el vapor, la primera tiende a escurrirse al chocar el flujo geotérmico con la pared del cilindro, y a depositarse en el fondo del recipiente; mientras que el vapor, que está menos sujeto a las fuerzas centrífugas, tiende a subir e introducirse en el tubo cilíndrico. En la figura III.13 se muestra un separador del tipo ciclónico.

ii) Tipo de Sistema de Control del Nivel del Agua del Separador:

Los separadores deben contar con algún sistema para medir la cantidad de agua almacenada en su interior, aunque la elección - del tipo de medidor es difícil y debe realizarse con mucho cuidado - ya que suelen verse seriamente afectados por la deposición de sales. El control del nivel de agua resulta también importante para abatir el contenido de gases incondensables en el vapor.

iii) Válvulas Check de Esfera y Discos de Ruptura: Las válvulas de bola o esféricas son dispositivos de seguridad instalados en la línea de vapor, que hacen la función de trampa de agua, debido a que evitan el arrastre de la misma en el vapor conducido a las turbinas.

Generalmente se encuentran instaladas después del separador ciclónico con el objeto de impedir el paso de agua en exceso -

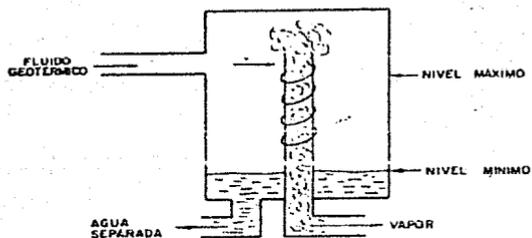
que pudiera dejar pasar el separador en caso de alguna falla. En realidad la principal función de las válvulas de esfera es proteger a la turbina, impidiendo el paso de agua a ellas. Los discos de ruptura, por su parte, funcionan en caso de una sobrepresión por un cierre de alguna válvula check, o debido a un disparo de la turbina, enviando el vapor a la atmósfera y evitando así mayores daños a los equipos y principalmente a la turbina.

En general los discos de ruptura funcionan solamente en caso de que la válvula automática de alivio fallara, y posteriormente fallaran también las válvulas de seguridad, ya que ambas se diseñan para funcionar antes que los discos de ruptura.

iv) Evaporador Instantáneo: Este tiene la función de convertir parte de la mezcla geotérmica proveniente de los pozos, en vapor, -- por medio de la reducción de la presión. Existen muy diversos tipos de evaporadores, pero el parámetro principal de diseño de todos ellos es la eficiencia de separación del vapor del agua.

v) Deshumidificador: También conocido como secador o denistor, tiene la función de eliminar la humedad residual del vapor separado, esto es, secarlo. Lo que se persigue es eliminar cualquier gota de líquido que haya logrado pasar o cualquier gota de vapor que se haya condensado en la tubería en el trayecto entre el separador y el citad deshumidificador, además de eliminar partículas muy pequeñas que hayan podido colarse; todo ello con el fin de evitar que puedan llegar a la turbina y dañarla. En la figura III.14 se muestra un esquema muy básico de un deshumidificador.

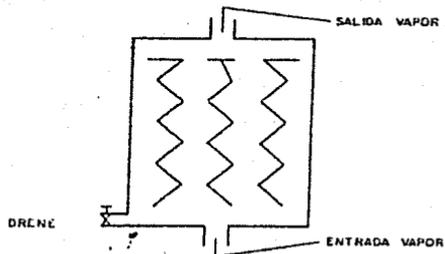
FIGURA III.13) SEPARADOR CICLONICO. TÍPICO.



SEPARADOR CICLONICO.

Fuente: Alternativas de Desarrollo en Campos Geotérmicos. (1985).

FIGURA III.14) DESHUMIDIFICADOR. TÍPICO.



DESHUMIDIFICADOR.

Fuente: Alternativas de Desarrollo en Campos Geotérmicos. (1985).

vi) Sistema de Tuberías: En general el arreglo de tuberías en una planta geotérmica es muy grande (dependiendo de la localización de la planta y la distribución de los pozos), por lo que representan una parte muy importante del costo de construcción de la planta.

Por ello resulta de suma importancia el diseño adecuado de las mismas. Como los fluidos geotérmicos salen con cantidades significativas de gases corrosivos, sales, y ocasionalmente algunos otros materiales como arena, es necesario que en el diseño de las tuberías e tengan en cuenta las medidas necesarias a fin de evitar los efectos de la corrosión y erosión, utilizando tuberías de acero al carbón, razonablemente resistentes, y usando tuberías de acero inoxidable exclusivamente cuando se necesiten; todo ello con el objeto de no encarecer demasiado el costo de las mismas, para que la planta pueda seguir siendo económicamente competitiva.

En los campos de tipo sedimentario es conveniente que los arreglos de tuberías sigan una disposición hexagonal (perforando los pozos de manera tal que permita seguir esa disposición), ya que generalmente son planos, lo cual facilita mucho las cosas.

Este tipo de distribución tiene la ventaja de permitir un desarrollo racional y flexible del campo; además de que reduce los costos en tuberías, interconecta los pozos y permite un adecuado desarrollo a futuro del campo. Esto no puede realizarse en los campos de tipo ígneo, ya que generalmente su configuración es montañosa, además de que la perforación de los pozos sigue el patrón de fallas existentes en la zona, por lo que no puede seguirse el patrón hexagonal.

Otros puntos importantes que deben tomarse en cuenta al hacer el diseño del sistema de tuberías son: Que las tuberías a lo largo de pozo además de sufrir los efectos térmicos y de corrosión y erosión antes mencionados, están sujetas a esfuerzos mecánicos adicionales debido a su conexión al árbol de válvulas, lo cual produce movimientos que pueden variar de 10 a 30 mm,\*\* además de vibraciones y otro tipo de efectos; las juntas de expansión que permiten la realización de configuraciones más complicadas en las tuberías, con el consecuente ahorro en las mismas, aunque debe tenerse en cuenta que en campos con contenidos muy altos de gases corrosivos no pueden utilizarse ya que no resistirían su efecto; las trampas de purgado que ayudan a mejorar la pureza del vapor que circula en las tuberías; las válvulas generales, como las de compuerta entre otras, las cuales sirven para aislar un pozo o alguna sección de un vaporoducto; las válvulas de seguridad; y la válvula automática de alivio.

G) Diseño de los Aparatos de Control y Seguridad de la Planta: Los puntos más importantes dentro de este grupo son:

i) Cuarto de Control: Generalmente suele adoptarse un sistema de control central con señalizaciones gráficas, luminosas y audibles.

La idea es que desde el cuarto de control puedan conocerse las condiciones de operación de la turbina, de todos los equipos auxiliares y del sistema de recolección de vapor. Por otra parte, resulta ideal que tanto las válvulas alrededor de los pozos como el equipo auxiliar puedan manejarse a control remoto desde el cuarto de control.

\*\* Geothermal Power Generation.  
Step 6, Mitsubishi Heavy Industrie.  
Tokyo, Japan. Publicado por el IIE en la referencia E626.

Desde el punto de vista operacional las plantas geotermo---  
eléctricas tienen las siguientes características: No requieren de  
muchos auxiliares; la generación de energía es generalmente constante  
sin requerir continuamente de grandes cambios; no suelen pararse  
y volverse a poner a trabajar con frecuencia, por ello es recomendable  
que el arranque de la turbina se realice desde el tablero de arranque,  
mientras que la sincronización y el control de carga deben hacerse desde el  
cuarto de control\*\*.

- ii) Tablero de Arranque de la Turbina: Este debe ser compacto y reunir los elementos indispensables para su control y seguridad.
- iii) Aparatos de Protección en General: Deberán determinarse los aparatos de paro de emergencia y alarma de la turbina y algunos otros equipos fundamentales de la planta.

Aquí deberá definirse el grado exacto de automatización y control de la planta, ya que tanto ésta, como los pozos, pueden operarse con solo unas cuantas o ninguna persona, con un control remoto de supervisión y control.

H) Diseño del Sistema de Control y Fuerza: Algunos de los conceptos más importantes que deben diseñarse dentro de este grupo son, entre otros; Tableros de relevadores; transformadores principales y auxiliares; subestación unitaria; centro de control de motores; sistema de tierras, alumbrado e intercomunicación; conduits y charolas; interruptores de potencia; cuchillas; etc.

\*\* Geothermal Power Generation.  
Step 6, Mitsubishi Heavy Industrie.  
Tokyo, Japan. Publicado por el IIE en la referencia E626.

I) Elaboración de Especificaciones: Una vez que se han decidido los tipos de equipos que se utilizarán, estos deberán especificarse pudiendo clasificarse en las siguientes áreas principales: Civil, Mecánica, Eléctrica, De Diseño de Planta, Instrumentación y Control, y Químico-Ambiental.

Los equipos más importantes que deberán especificarse son:

- Turbogenerador (turbina, generador).
- Tuberias, accesorios, reportes y aislamientos térmicos.
- Grua viajera.
- Equipo de instrumentación y control.
- Equipo eléctrico auxiliar.
- Condensador.
- Separador (En los campos de líquido dominante).
- Válvulas.
- Bombas de agua.
- Torre de Enfriamiento.
- Subestación.
- Sistema contra incendio.
- Equipos de proceso.
- Equipo periférico auxiliar en general.

los puntos más importantes que deberán incluir son: Descripción del proyecto, condiciones de operación, características de diseño, desviaciones, datos físicos, precios, programa de entrega, etc. Además, muchas de las especificaciones involucran listas de equipo y materiales.

J) Evaluación de Ofertas: Una vez hechas las especificaciones se solicitan cotizaciones y, en su caso, se realizan concursos.

Las ofertas de los fabricantes se deberán evaluar desde el punto de vista técnico-económico, tomando en cuenta las características técnicas, el plazo de entrega, precio, y experiencia del fabricante, y en base a todo ello elegir a quien se realiza la compra.

K) Revisión de Planos de los Fabricantes: Una vez que se ha colocado el pedido, el fabricante deberá entregar toda la información relacionada con las especificaciones, como planos, manuales, datos técnicos, etc., y los encargados de la ingeniería de detalle deberán revisarlos y, en su caso, aprobarlos si es que se ajustan a las especificaciones previamente fijadas. Por otro lado, es común que la información de algunos equipos sea vital para la especificación de otro en el sistema.

L) Elaboración de Planos: Esta actividad muestra de alguna manera el avance o estado del proyecto. La cantidad de planos que se realicen estará en función del grado de detalle que se requiera en el proyecto, el cual a su vez dependerá significativamente de la experiencia del constructor y/o de la historia del proyecto que se debe guardar.

M) Programa Detallado de Construcción: Es un desglose de las actividades de un sistema o montaje de un equipo, y deberá realizarse en base al programa intermedio de construcción. El programa detallado de construcción tiene por objetivo constituir una guía diaria de las actividades de construcción.

Es conveniente que simultáneamente a este programa se realice el presupuesto que puede llamarse definitivo, cuando la ingeniería lleve un avance del orden del 40%,\*\* y que será una base presupuestal para el control de los costos de construcción.\*\*\* Los costos básicos que debe incluir este presupuesto son los de ingeniería, equipo, materiales e instalación. Dentro del mismo deberá incluirse un registro de abastecimientos que permita el control de calidad y seguimiento de las adquisiciones necesarias para la ejecución de la obra.

N) Libro de Datos de la Planta: El libro de datos de la planta deberá irse realizando conforme se vaya recibiendo la información definitiva y sea aprobada. En este libro se registran todos los datos de diseño, construcción y operación del equipo, lo cual será de gran ayuda, posteriormente, para el mantenimiento y conservación de la planta.

\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica.  
III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica.  
OLADE-CFE, 1980.

\*\*\* Muchos países, como los Estados Unidos, prefieren realizar el presupuesto definitivo con avances de un 60 a un 80% en la ingeniería, debido a que ello permite una programación y control presupuestal más exacta y menos riesgosa.

O) Manual de la Planta: Es muy importante que quede por escrito la forma en que deberán operarse cada uno de los equipos y sistemas de la planta, por ello toda esa información deberá quedar asentada en un manual.

Es importante hacer notar que no es indispensable que se ha ya terminado toda la ingeniería de detalle del proyecto para poder iniciar el programa de construcción de la planta, ya que muchos estudios particulares de ingeniería pueden irse completando simultáneamente con la realización de la construcción. Es por eso que durante la etapa de elaboración de la ingeniería de detalle se debe iniciar la construcción de acuerdo a los programas de obra y secuencia de entrega de la ingeniería de detalle.

Durante la ingeniería de detalle la computadora puede y debe ser una herramienta valiosísima, tanto en el diseño técnico, como en la elaboración de especificaciones y del programa detallado de construcción, entre otros.

Pueden aplicarse, por ejemplo, programas computacionales para optimizar el sistema de enfriamiento; diseñar termodinámicamente una turbina; diseño del separador; cálculo de bombas, compresores, equipo de aire acondicionado, tuberías (espesor, diámetro), velocidad de flujo, agua de servicio, agua contra incendios, torres de enfriamiento, transformadores, cimentaciones, estructuras, eyectores, caídas de tensión; listado de planos civiles, estructurales, arquitectónicos, normas, especificaciones; precios de materiales, equipos y accesorios, etc.

Deberán emplearse también las mismas técnicas de planeación y control de actividades utilizadas en la programación realizada en la ingeniería básica (PERT, CPM, MAP, etc.).

De la ingeniería debe decirse, en conclusión, que requiere un gran esfuerzo en el área técnica que, sin embargo, es indispensable cuando se desea optimizar el uso de los recursos utilizados en la realización del proyecto, lo cual habrá de reflejarse en una operación económica, además de una instalación racional, adecuada y susceptible de ser ampliada de manera eficiente.

la ciencia nos ha prometido la verdad, pero nunca nos ha prometido ni la paz ni la felicidad.

- Gustavo Lebon -

CAP XIII) CONSTRUCCION DE CENTRAL Y CAMIO.

Como anteriormente se mencionó, la construcción se traslapa con la ingeniería de detalle, ya que se ha comprobado que resulta — conveniente iniciar la primera cuando se tenga cierto avance en la — ingeniería, aun y cuando esta no se haya completado.

Durante la construcción resulta conveniente tomar en cuenta ciertas premisas antes de comenzar el desarrollo en si, estas son: \*\*

- La mejor calidad es la más económica porque no se repite.
- La supervisión e inspección de todas las actividades, debe ser una labor constante y efectiva.
- Se deben tener elementos para comparar la calidad y los rendimientos.
- Deben buscarse standars de rendimientos y calidad.

\*\* Instructivo de Ingeniería de Costos de la P.T. Mazatlán II.  
 Coordinadora Ejecutiva de Occidente, Gerencia General de Construcción, Comisión Federal de Electricidad.  
 México, sin fecha.

Antes de comenzar la construcción deberá ponderarse, en base a los bancos de datos existentes, a los volúmenes de obra calculados y a los programas y presupuestos realizados durante la ingeniería, la asignación de recursos humanos, materiales, financieros y de equipo y maquinaria. Asimismo deberá tenerse muy en cuenta que es precisamente en la etapa de construcción cuando se realiza la inversión más fuerte de capital de todo el proyecto (en los recursos antes citados), por lo que deberá llevarse un registro y control muy cuidadoso y detallado de la misma, comparándose frecuentemente lo hecho con lo programado, a fin de poder corregir a tiempo las desviaciones.

De manera muy general, puede decirse que el proceso de construcción es el siguiente:<sup>\*\*</sup>

A) Trabajos Preparatorios:<sup>\*\*\*</sup> Como instalación de oficinas, bodegas, talleres, almacenes y otras instalaciones provisionales como las de agua, luz, drenaje, etc., que posteriormente habrán de utilizarse durante la construcción propiamente; además de otras instalaciones necesarias para las áreas administrativas y técnicas, así como la construcción de caminos de acceso y otras comunicaciones y la explotación de materiales locales (agregados y otros). Durante este paso deberá elaborarse también el libro de campo.

\*\* SOTO, Rodríguez Humberto; ESPEJEL, Zavala Ernesto; MARTINEZ, -- Frijas Hector.  
La Formulación y Evaluación Técnico-Económica de Proyectos Industriales.  
Editorial CENETI, 2a. Edición. México, 1978.

\*\*\* Antes de empezar estos trabajos deberá determinarse si se harán por administración directa o se darán a contrato, ya que los mecanismos en el proceso de construcción sufrirán variaciones según el caso.



el punto de vista institucional; <sup>\*\*</sup>asimismo deberá concientizarse al personal en cuanto a su responsabilidad en la calidad del trabajo, el cual debe estar, por otra parte, dentro de ciertos mínimos aceptables.

Para un proyecto específico, la asignación de recursos humanos se puede plantear en cuatro etapas principales: <sup>\*\*\*</sup>

- Planeación de necesidades de personal, en cantidad, características y períodos de tiempo.
- Establecimiento de políticas normativas, procedimientos, descripción de funciones, planes de capacitación, sistemas de incentivos, etc., todo lo anterior con el fin lograr un buen funcionamiento del personal a nivel individual y de grupo.
- Distribución adecuada de los recursos disponibles, asignando al personal apropiado a las diferentes funciones o posiciones.
- Contratación de los recursos faltantes. En este punto la realización de exámenes guarda un papel fundamental, ya que permitirá la mejor selección del personal, lo cual resulta particularmente importante cuando se trata de escoger a los ingenieros y a los técnicos especializados como soldadores, electricistas, instrumentistas, etc.

\*\* PARERA, Bahi Amor.  
Programación Integral de Nuevas Obras.  
2a. Reunión de Construcción.  
Gerencia General de Construcción. Comisión Federal de Electricidad. Ponencias. México, D.F., julio de 1978.

\*\*\* Idem al anterior.

Es importante que durante este paso se fijen también los tipos de controles que más adelante habrán de utilizarse para el control de la construcción.

D) Realización de la Construcción y Montaje: Si bien el proceso de construcción de una central geotermoelectrónica depende de cada país o campo en particular, existe una secuencia más o menos general aplicable a todos ellos, esta es;

Las actividades suelen comenzarse en las áreas exteriores con los trabajos de obra civil como construcción del drenaje sanitario y pluvial; construcción de la caseta de servicio y de los edificios permanentes; mejoramiento del sitio, áreas de estacionamiento, guarniciones, cercas, caminos; y complementarse y continuarse con diversos trabajos electromecánicos y de montaje, como la instalación de bombas de agua de servicio, contra incendios y de transferencia de agua y aceite; instalación del sistema contra incendios y de agua de servicio; e instalación de la obra eléctrica exterior entre muchos otros.

Posteriormente se inician los trabajos en la casa de máquinas que determinan la ruta crítica-, realizándose entre otros, la colocación de pilotes y cementación;\*\* construcción del pedestal; -- instalación de losas, techos y muros; continuando con la obra electromecánica y el montaje como; montaje de la estructura de la casa-

\*\* Estos trabajos suelen realizarse casi al mismo tiempo que los de las áreas exteriores.

de máquinas, grúa viajera, turbogenerador, condensador; instalación de equipos de aire acondicionado y ventilación; realización de acobados; montaje de compresores y tuberías; instalación de instrumentación miscelánea, transformadores, buses, tableros, etc.

A continuación pueden iniciarse de manera casi simultánea los trabajos en el cuarto de control, sistema de agua de circulación y enfriamiento, y en el área de pozos. Dentro de los trabajos más importantes en el cuarto de control se tienen la cimentación; instalación de techos, muros y losas; montaje de la estructura de acero; instalación de tableros, relevadores e instrumentación miscelánea y eléctrica especializada. Los trabajos más importantes del sistema de agua de circulación y enfriamiento son: La construcción de la torre de enfriamiento; construcción de ductos; instalación de tuberías y válvulas de agua de circulación y de agua de enfriamiento; instalación de bombas; etc.

En el área de pozos deberán realizarse los trabajos de construcción de caminos de acceso y plataformas; construcción del silenciador y del contrapozo; cementación de equipos mecánicos; construcción de los canales de agua de desecho; montaje de equipos mecánicos; instalación de tuberías, válvulas y aislamientos; etc.

Para finalizar deberán realizarse los trabajos de la subestructura, que incluyen la cimentación y montaje de la estructura metálica; instalación de sistemas de tierras, herrajes, aisladores, conectores, buses, transformadores, interruptores, cuchillas, apartarroyos, etc. En la figura III.16 puede apreciarse mejor, de manera gráfica, el proceso de construcción antes descrito.

\*\* Estos trabajos pueden iniciarse simultáneamente a los realizados en la obra civil de las áreas exteriores.

Todos los trabajos de construcción y montaje deberán ser supervisados para poder garantizar la calidad y término adecuado de los mismos. Si bien la supervisión le atañe al que desarrolla el proyecto, es común que los fabricantes supervisen el montaje de los equipos más caros y/o delicados a fin de colaborar a que el mismo se realice sin ningún contratiempo.

Para que la supervisión sea más efectiva deberán seguirse las normas de construcción previamente fijadas, mismas que deberán garantizar la adecuada y necesaria calidad en el proyecto.

Otro punto muy importante durante la construcción es el -- que los abastecimientos lleguen en el momento preciso al campo, a fin de no detener el avance de la obra, por lo que deberá llevarse un riguroso seguimiento y control de los abastecimientos y compras, además del seguimiento de los fabricantes con el objeto de verificar su cumplimiento en las normas de calidad y tiempos de entrega de los equipos y materiales que se les hayan pedido.

La ingeniería de costos juega un papel muy importante antes y durante la etapa de construcción, ya que permite a los encargados de la administración de la misma:\*\*\*

\*\* Como es el caso del turbogenerador y el condensador.

\*\*\* Fuentes V. Indalecio.  
Sistema de Ingeniería de Costos en las Obras.  
2a. Reunión de Construcción.  
Gerencia General de Construcción. Comisión Federal de Electricidad. Ponencias. México, D.F., julio de 1978.

- 1.- Controlar sus rendimientos y costos unitarios.
- 2.- Evaluar y controlar periódicamente y de forma general los programas, presupuestos y el empleo de recursos humanos (horas-hombre) y de maquinaria y/o equipo programado.
- 3.- Controlar avances de obra: Por conceptos en la obra civil y por sistemas o actividades en las obras mecánicas y eléctricas.
- 4.- Reducir costos mediante la interpretación y corrección de las desviaciones.
- 5.- Determinar la eficiencia con que han laborado cada una de las áreas técnicas.
- 6.- Llevar un registro de:
  - a) Catálogo bien definido de conceptos.
  - b) Costos unitarios por concepto (materiales, mano de obra y equipos). La anexión de gráficas suele ser muy útil.
  - c) Rendimientos en horas-hombre por actividad.
  - d) Cantidad y distribución de los recursos empleados (personal, materiales, maquinaria y/o equipo), por áreas u operaciones.
  - e) Procedimiento constructivo empleado.
- 7.- Elaborar:
  - a) Reportes-resumen que muestren las principales actividades por área (civil, mecánica, eléctrica), en un período.
  - b) Gráficas con el avance de construcción por áreas y por -- cuentas.
  - c) Gráficas con las cantidades de materiales utilizados en la obra (cimbra, acero de refuerzo, concreto, etc.).

- d) Programas de construcción y rutas críticas actualizadas (en base a las modificaciones hechas sobre la marcha). Precisamente en la etapa de construcción, es donde tienen su principal aplicación y utilidad tanto los programas de construcción como los de ruta crítica. Para mostrar la diferencia en el grado de detalle entre los diferentes programas de construcción, en la figura III.15 se muestra un programa de conceptos principales, en la figura III.16 un programa general de construcción y en la figura III.17 un programa detallado de construcción (específicamente el montaje del turbogenerador).
- e) Reportes con los principales problemas que afecten el buen desarrollo de la obra.
- f) Una sección fotográfica que muestre los avances y detalles de la obra.

Para el manejo de la información en todos los reportes, -gráficas, etc. señaladas anteriormente resulta conveniente separarla en las cuentas más importantes (pozos, turbogenerador, etc.) y a su vez subdividirla en subcuentas, ya que esto permite llevar un mejor control presupuestal y de los recursos.

E) Pruebas, Ajustes, Arranque y Puesta en Servicio de las Instalaciones: Generalmente existe una interfase entre este paso y el anterior, ya que muchos de los equipos se prueban y echan a andar aun antes de haber terminado por completo la construcción, lo cual se traduce en un beneficio para el avance de la obra.

Sin embargo, siempre, antes de poner en operación comercial una unidad o una central geotermoeléctrica, deberán efectuarse todas las pruebas al equipo que la compone.

Por ello se realiza lo que se llama puesta en servicio, que consiste en: <sup>\*\*\*</sup> Poner en servicio, arrancar, echar a andar, poner a funcionar: equipo por equipo, sistema por sistema; vigilando que todo funcione correctamente y de acuerdo con sus especificaciones e instructivos, hasta lograr que todos los equipos y sistemas, en forma armónica, funcionen en conjunto y como un todo hasta lograr las metas establecidas, que para el caso de una planta geotermoeléctrica consiste, básicamente, en la producción de electricidad de acuerdo a las características del proyecto, todo ello dentro de la mayor seguridad y operabilidad de las instalaciones.

La puesta en servicio se debe hacer conjuntamente entre el personal que construyó la central, el que va a operarla, y el personal especializado de los fabricantes de los equipos principales, todo ello basado en un programa de ruta crítica establecido previamente y de común acuerdo.

\*\* RAMOS, Efraínas Hernández.  
 Coordinación de la Puesta en Marcha.  
 2a. Reunión de Construcción.  
 Gerencia General de Construcción. Comisión Federal de Electricidad. Ponencias. México, D.F., julio de 1978.

Aunque para poder cumplir con este programa deberá conocerse y planearse con la debida anticipación, que es lo que se va a poner en servicio, como se va a hacer y con que se va a hacer; por eso es recomendable que cuando el proyecto lleve un avance considerable, del orden del 70%, se nombre un coordinador de puesta en servicio que colabore en conjunto con los proyectistas y constructores, y cuya función principal será la de coordinar y supervisar la ejecución de las actividades de la puesta en servicio, además de que deberá desarrollar las siguientes actividades:\*

- a) Elaborar el programa de pruebas y puesta en servicio, el cual - deberá estar enmarcado dentro de un programa más general de construcción.
- b) Revisar criterios de diseño y todos los dibujos y diagramas del proyecto, verificando si en el diseño se incluyen todas las previsiones necesarias para las pruebas y puesta en servicio.
- c) Prever todas las instalaciones y equipos temporales que serán necesarios; así como los suministros que habrán de necesitarse, para probar los equipos y posteriormente echar a andar la planta, como energía eléctrica, agua, combustibles, vapor, etc.
- d) Actualizar todos los diagramas de flujo, unifilares, trifilares y lógicos de control.
- e) Recopilar y verificar la existencia de todos los instructivos y manuales de instalación, operación y mantenimiento de todos los equipos.

\*\*\* RAMOS, Bárceñas Hernán.  
 Coordinación de la Puesta en Marcha.  
 2a. Reunión de Construcción.  
 Gerencia General de Construcción. Comisión Federal de Electricidad.  
 Ponencias. México, D.F., julio de 1978.

- f) Revisar si en las órdenes de compra de los equipos principales se incluyen los servicios de supervisión de los fabricantes, - para los equipos principales, a fin de detectar los que a su -- juicio lo requieran. Deberá verificar adicionalmente si los -- tiempos establecidos cubren o no las necesidades del programa.
- g) Elaborar un instructivo general de la puesta en servicio.

f) Entrenamiento de técnicos y operarios sobre la operación y mantenimiento de la Planta: Este es un punto muy importante que deberá realizarse durante toda esta etapa a fin de que al terminarse la -- construcción todo el personal se encuentre lo suficientemente capacitado para realizar la operación y mantenimiento de la central sin mayores complicaciones.

Durante toda la etapa de construcción, la computadora resulta una herramienta fundamental, ya que puede utilizarse para el control (físico y financiero) del avance de obra; asignación de recursos, materiales y tiempos; control de compras y recibos de abastecimientos; mantener un adecuado control sobre el uso y manejo de los presupuestos; calcular volúmenes de obra; pago de gastos, sueldos, - materiales, etc.

FIGURA III.15) PROGRAMA DE CONCEPTOS PRINCIPALES.

CONCEPTO	1986	1987	1988	1989	1990	1991
1. SITIO						
2. ESTACIONAMIENTO						
3. CUBIERTA BANCAL						
4. SERVIDORES ADICIONALES						
5. CABLEADO Y EQUIPO						
6. INSTALACIONES						
7. EQUIPO						
8. SERVIDORES						
9. CABLEADO						
10. EQUIPO						
11. SERVIDORES						
12. CABLEADO						
13. EQUIPO						
14. SERVIDORES						
15. CABLEADO						
16. EQUIPO						
17. SERVIDORES						
18. CABLEADO						
19. EQUIPO						
20. SERVIDORES						

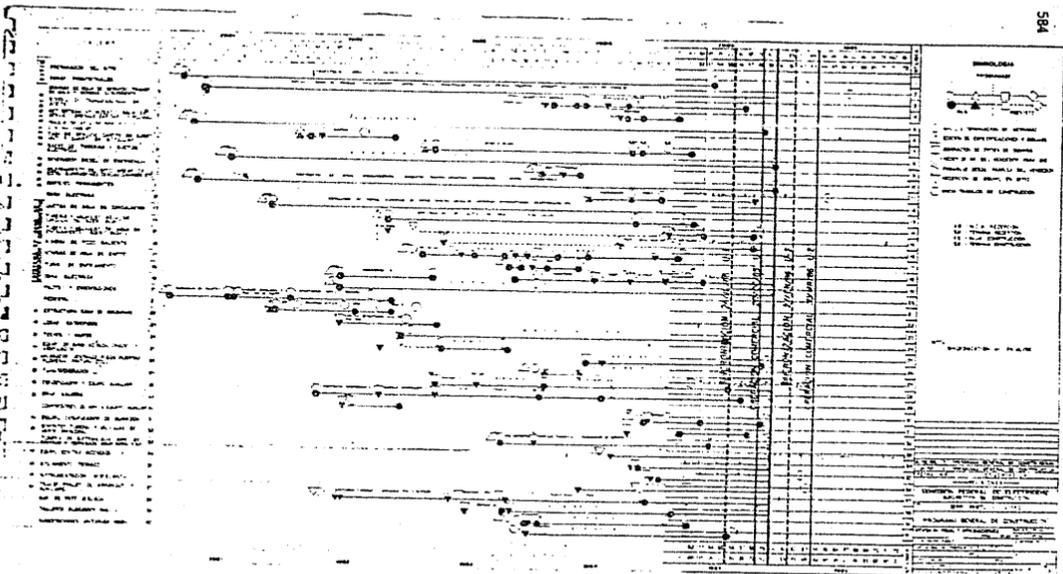
**SIMBOLOGIA**

- INICIO E TERMINACION DE ACTIVIDAD
- △ ESTACIONAMIENTO Y EQUIPO
- SERVIDORES
- ◇ EQUIPO
- ▽ EQUIPO EN SITIO

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD  
 SUBCOMISION DE INSTALACIONES  
 DIVISION DE PROYECTOS GEOTERMICO-ELECTRICOS  
 PROGRAMA DE CONCEPTOS PRINCIPALES

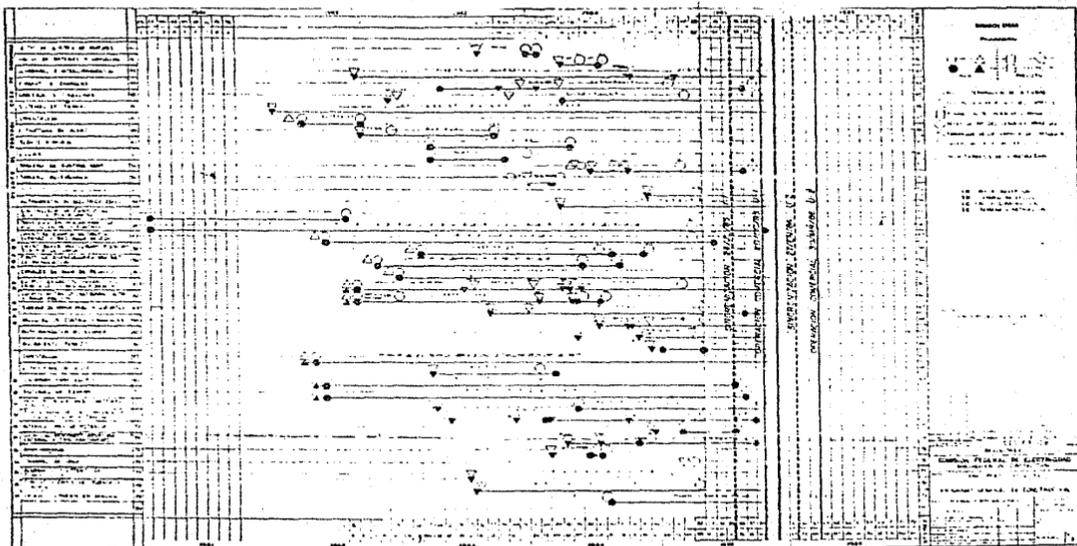
Fuente: Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos, Comisión Federal de Electricidad.

FIGURA III.16) PROGRAMA GENERAL DE CONSTRUCCION.



Fuente: Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos, Comisión Federal de Electricidad.

FIGURA III.16) PROGRAMA GENERAL DE CONSTRUCCION .....(continuación).



Fuente: Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad.



Arrojadme del paraíso cuando queráis, pero antes dejádmecomer la fruta del árbol del saber.

- Ingersoll -

#### CAP XIV) OPERACION Y MANTENIMIENTO.

##### XIV.1) Operación de Central y Campo.

Operación de la Central: Debido a su naturaleza, las plantas geotermoelectricas deben operarse como centrales de carga base \*\*, con objeto de aprovechar mejor la energía del campo geotérmico. La operación de las plantas geotérmicas es mucho más sencilla que la de las centrales termoeléctricas debido a que no requiere de generadores de vapor y todos sus auxiliares, siendo los pozos los que realizan esa función, por lo que se requieren controles más sencillos, lo que se refleja en una menor necesidad de personal, además de que se permite la posibilidad de realizar una automatización parcial o total de la planta.

Esto se traduce a su vez en una reducción de los costos de operación y mantenimiento.

Debido a que existen impurezas en el vapor geotérmico, como gases incondensables, gotas de condensado, sólidos disueltos y sólidos en suspensión que pueden causar incrustaciones y erosión en las turbinas, disminuyendo su capacidad y rendimiento y originando un mayor mantenimiento, deberá vigilarse todo el tiempo la buena operación de los separadores, filtros y purgas, a fin de evitar problemas excesivos. No es muy aventurado decir que la cantidad de impurezas en -

\*\* Debido principalmente a que las válvulas de los pozos no pueden estarse abriendo y cerrando continuamente, ya que eso implicaría graves riesgos de descontrol.

el vapor geotérmico que entra a la turbina, determinará de gran manera la confiabilidad y años de vida de la central geotérmica.

Por otra parte, y debido al elevado contenido de gases no condensables, las plantas geotermoeléctricas requieren para su operación de un sistema de extracción de gases de mucho mayor capacidad que el de las centrales térmicas convencionales.

Como en las plantas geotérmicas el vapor condensado sirve de repuesto para el sistema de agua de enfriamiento, generalmente no se requiere de un suministro externo de agua.\*\*

En los campos de líquido dominante es muy importante vigilar la eficiencia de operación del separador y/o del evaporador, ya que si no es la adecuada pueden entrar muchas impurezas a la turbina y causar considerables problemas. Para el caso de los campos de vapor dominante es importante vigilar continuamente el contenido de sólidos que vienen con el vapor y que también pueden causar serios problemas a las turbinas.

\*\* Aunque esto es cierto para las plantas de condensación y de flashco, no lo es para las de ciclo binario, que si requieren de un suministro extra.

Operación de los Pozos: Debe mencionarse que es prácticamente a partir de la inducción donde empieza la operación de los mismos, prosiguiendo después el desarrollo y finalmente su evaluación (consultar los capítulos IX.6 y X.1), para posteriormente interconectar los pozos al sistema de transporte de fluidos, a fin de iniciar su aprovechamiento.

Durante la explotación de los pozos tanto de producción como de reinyección, deberá recabarse información sobre su comportamiento, tal como condiciones de operación, cuantificación de gastos, características termodinámicas del fluido, análisis químicos, perfiles de temperatura, presión y calibración, comportamiento de elementos mecánicos, contenido de sólidos, etc.; asimismo deberá verificarse que el sistema de transporte de los fluidos funcione adecuadamente.

XIV.2) Mantenimiento de Central y Campo.

Mantenimiento de la Central: Aunque cada campo geotérmico presenta - características muy particulares que determinan condiciones muy específicas de mantenimiento para cada planta, existen algunos puntos que pueden considerarse comunes como son: \*\*

- Presencia de incrustaciones en las turbinas debido al arrastre de sólidos en el vapor, por lo que es recomendable desmontarlas y limpiarlas con chorros de aire y arena.
- Presencia de ácido sulfhídrico que puede crear grandes problemas de corrosión, sobre todo en los equipos que tienen elementos de cobre o sus aleaciones, como los equipos eléctricos de protección y medición. Además dicho compuesto, disuelto en el agua de circulación, ataca al acero al carbono, madera y concreto, por lo que deberá ponerse especial atención en el mantenimiento de enfriadores de aceite e hidrógeno, canales de circulación de agua fría y cañerías, y madera, la cual además puede degradarse por ataques químico-biológicos. \*\*\*

\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica.  
III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica.  
OLADE-CFE, octubre de 1980.

\*\*\* Idem al anterior.



Durante el mantenimiento de un pozo deberá tenerse en cuenta que cuando existan fallas muy grandes, que impidan su restitución al sistema, deberá preverse el abandono del mismo, por lo que deberá dejarse bien taponeado a fin de que no pueda resultar un peligro para los demás pozos o para el campo.

Siempre que se opere o explote un pozo deberá tenerse en consideración la posibilidad de un descontrol del mismo. Esto puede ser de dos tipos: Por daños en el árbol de válvulas o por daños en las tuberías del pozo. El primero suele deberse a problemas de calidad, capacidad y diseño de los materiales, válvulas, conexiones; así como a un inadecuado mantenimiento y operación del árbol de válvulas.

El descontrol por daños en las tuberías del pozo, se presenta con mayor frecuencia cuando se tiene únicamente una tubería de adme, anclaje y otra de producción.\*\*

Mantenimiento del Campo: Este tiene como objetivo básico la conservación en buen estado de funcionamiento de los elementos mecánicos y civiles de superficie. Es claro que todo el sistema que permite el manejo y conducción de los fluidos geotérmicos está expuesto a diversos problemas como incrustación, corrosión y erosión, debido al medio ambiente húmedo y salino, temperatura, presión, esfuerzos, reacciones, asentamientos diferenciales del terreno, drenaje, filtraciones, etc., que requerirá, por lo tanto, de un adecuado mantenimiento para poder seguir funcionando correctamente.

\*\* Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica.  
 III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica.  
 OLADE-CFE, 1980.

Los principales equipos y sistemas que deberán estar sometidos a mantenimiento de campo son: Arbol de válvulas; sistema de protección de los equipos, como discos de ruptura, válvulas esféricas, etc.; separador (en caso de existir); válvulas; tuberías de mezcla, agua y vapor; aislamiento térmico de las tuberías; soportería y estructuras metálicas; silenciador y canal vertedor; contrapozo, etc.

Es recomendable que también durante esta etapa se realice una actualización de los costos comparativos de la planta geotermoelectrónica, con otro tipo de planta, debido a que ya se tienen los costos reales y la comparación será más precisa y verídica.

Durante la etapa de operación y mantenimiento deberá proseguirse con la capacitación del personal -adicional a la ya dada durante la etapa de construcción- a fin de tener un aprendizaje continuo y actualizado, y retroalimentarse de lo aprendido durante la operación.

Por otro lado, cuando se tiene el caso de que los que producen el vapor en el campo se lo venden a los que manejan la central y generan la energía eléctrica, cada parte deberá realizar su propio mantenimiento, lo cual generalmente incrementará los costos y los problemas.

Finalmente por lo que toca al uso de la computadora durante la etapa de operación y mantenimiento, este puede variar notablemente en base al grado de automatización que se tenga, sin embargo, siempre será un valioso auxiliar, independientemente de que podrá utilizarse para controlar los programas de mantenimiento, capacitación, etc.

REFERENCIAS( DESARROLLO DE UN PROYECTO  
GEOTERMICOLECTRICO )

- 1.- Actualización a Abril de 1985 de la Dirección en el Campo Geotérmico de Los Azufres, Michoacán.  
Reporte N° 1385-009. Subgerencia de Estudios Geotérmicos, Departamento de Evaluación de Yacimientos, Oficina de Reinyección.  
Morelia, Mich., junio de 1985.
- 2.- Apuntes de la Materia Evaluación de Proyectos Industriales.  
Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Eléctrica.  
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.  
México, 1983.
- 3.- Apuntes de la Materia Gestión de Proyectos .  
Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Eléctrica.  
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.  
México, 1985.
- 4.- ARMSTEAD, H. Christopher H.  
Geothermal Energy - Review of Research an Development.  
3<sup>th</sup> Imp. 1977.  
París, UNESCO, 1973.
- 5.- CADENAS, Tovar Roberto.  
Turbogeneradores Geotérmicos de 5 MW, Fabricación Nacional y --  
Costos.  
XII Congreso Nacional Bienal del CIME, 4-7 .  
México, noviembre de 1986.

- 6.- Cerro Prieto, Underground Power.  
Comisión Federal de Electricidad..  
México, 1971.
- 7.- Costos a Precios de 1984 de Centrales Geotérmicas.  
Departamento de Factibilidad de Proyectos, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Comisión Federal de Electricidad.  
Morelia, Mich., diciembre de 1984.
- 8.- DIMATTEO, Camoirano Juan J.  
Apuntes de la Materia Diseño de Sistemas Productivos.  
Facultad de Ingeniería, UNAM.  
México, febrero de 1982.
- 9.- DIPIPO, Ronald.  
Geothermal Energy as a Source of Electricity, A Worldwide Survey of the Design and Operation of Geothermal Power Plants.  
U.S. Department of Energy (DOE), Division of Geothermal Energy.  
January, 1980.
- 10.- DIPIPO, Ronald; KESTIN, Joseph; KHALIFA, H. Ezzar; RYLEY, D. John.  
Sourcebook on the Production of Electricity from Geothermal Energy.  
U.S. Department of Energy (DOE), Division of Geothermal Energy.  
March, 1980.
- 11.- DOMINGUEZ, Aguirre Bernardo.  
Metodología de Explotación Geotérmica y Administración de Proyectos Geotérmicos.  
Symposium Centroamericano, Managua, Nicaragua.  
OLADE - Banco Interamericano de Desarrollo.  
Marzo de 1986.

- 12.- Estrategias Propuestas para la Generación de Energía Eléctrica en la Zona Sur del Campo Geotérmico de Los Azufres, Michoacán. Reporte 1384-023. Departamento de Evaluación de Yacimientos, -- Subgerencia de Estudios Geotérmicos, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, noviembre de 1984.
- 13.- Estudio Comparativo de Costos entre la Central "BACIA" y la Central "CERRO PRIETO II".  
Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, sin fecha.
- 14.- GARDUÑO, Navarro Enrique.  
Apuntes de la Materia Tecnología y Economía del Petróleo el Gas Natural y la Geotermia.  
D.E.P.F.I., U.N.A.M.  
México, 1985.
- 15.- Geothermal Energy Projects: Planning and Management.  
Edited by Louis J. Goodman and Ralph N. Love.  
Pergamon Press, Pergamon Policy Studies, on Science and Technology.  
U.S.A. 1980.
- 16.- Geothermal Power Generation.  
Mitsubishi Heavy Industrie.  
Step 1 - 8  
Tokyo, Japan.

- 17.- GIACOPELLO, Vizcaino Michel E.  
Alternativas de Desarrollo en Campos Geotérmicos.  
Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás -  
de Hidalgo, Morelia, Mich.  
México, junio de 1985.
- 18.- GONZALEZ, José; PEREZ, Jorge; SALAZAR, Octavio; SANDOVAL, Hun-  
berto.  
Generación Geotérmica de Electricidad en México.  
Revista Ingeniería Mecánica y Eléctrica. AMIME.  
México, enero - febrero 1986.
- 19.- GUIZA, Ezkauriatza Alejandro D.  
Manual Práctico Preliminar para la Instalación de Plantas Geo-  
termoeléctricas a Boca de Pozo.  
Tesis de Especialidad en Geotermia.  
Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de Baja Califor-  
nia.  
Mexicali, Baja California, México, marzo de 1986.
- 20.- HIRIART, Le Bert Gerardo.  
Comparación Económica entre Centrales Geotérmicas y Plantas de  
Contrapresión.  
Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geoter-  
moeléctricos.  
México, 1985.
- 21.- HIRIART, Le Bert Gerardo.  
Los Azufres, Geothermal Development.  
Geothermal Resources Council Bulletin.  
January, 1985.

- 22.- HOLT, Ben; CAMPBELL, Richard G.  
The Mammoth Geothermal Project. Progress Report.  
Geothermal Program Review III.  
El Centro, Ca. Proceedings, Springfield, Va: NTIS. 1984.
- 23.- Informe Preliminar sobre el Anteproyecto de Tejamaniles.  
Cap. VI, Ingeniería Básica y Evaluación Preliminar del Sector  
Tejamaniles.  
Oficina de Pruebas y Modelos de Simulación, Gerencia de Proyec-  
tos Geotermoeléctricos. Comisión Federal de Electricidad.  
México, 1985.
- 24.- Instructivo de Ingeniería de Costos de la P.T. Mazatlán II.  
Coordinadora Ejecutiva de Occidente, Gerencia General de Cons-  
trucción. Comisión Federal de Electricidad.  
México, sin fecha.
- 25.- LACY, G. Robert; NELSON, T. Tiffany.  
Heber Binary Project. Binary Cycle Geothermal Demonstration -  
Power Plant.  
Geothermal Resources Council, Transactions vol. 6.  
U.S.A., october 1982.
- 26.- MERCADO, Gonzalez Sergio.  
Proyecto Geotermoeléctrico de Cerro Prieto: Contaminación y -  
Protección Básica.  
2° Simposium de la Naciones Unidas sobre Geotermia.  
San Francisco, California, U.S.A. 1975.

- 27.- MERCADO, Gonzalez Sergio; Bamejo, Francisco J.  
Ecological Aspects on Cerro Prieto Geothermal Field.  
Mexico, sin fecha.
- 28.- Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica.  
III Seminario sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica.  
OLADE-CFE.  
Cerro Prieto, Baja California Norte, México, octubre 13-17 de 1980.
- 29.- MOHORICH, M. Leroy.  
Geothermal Electric Power Plant Siting: Federal Permitting Policy and Report of Progress.  
Geothermal Resources Council, Transactions vol. 6.  
U.S.A., octubre 1982.
- 30.- MULAS, Del Pozo Pablo; NIEVA, Gomez David; HOLLAND, F.A.  
Developments in Geothermal Energy in Mexico.  
Part One: General Considerations.  
Heat Recovery Systems. Vol. 5, N° 4, pp. 227-283.  
Great Britain, 1985.
- 31.- NELSON, T. Tiffany.  
Heber Binary Project.  
Geothermal Resources Council.  
Transactions, vol. 9 - part. II.  
August, 1985.
- 32.- NewsLetter  
UNITAR/UNDP, Centre on Small Energy Resources Issue N° 3.  
May, 1986.

- 33.- P. PEMPTE, Et. Al.  
Feasibility of Electricity Generation from Medium Enthalpy ---  
(100-200 °C) Geothermal Sources.  
Luxemburg: Commission of the European Communities, 1983.  
Report EUR 8791 EN.
- 34.- Programa de Desarrollo Informático de la Gerencia de Proyectos  
Geotermoelectrículos.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, 1986.
- 35.- Proyecto Geotermoelectrónico Los Azufres. .  
Los Azufres, Michoacán.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, agosto de 1982.
- 36.- Reporte de Avance de Construcción C.P. III.  
Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto. Comisión Federal de  
Electricidad.  
México, noviembre de 1985.
- 37.- 2a. Reunión de Construcción.  
Gerencia General de Construcción. Comisión Federal de Electri  
cidad.  
Ponencias, autores varios.  
México, D.F., julio de 1978.

- 38.- SOTO, Rodriguez Humberto; ESPEJEL, Zavala Ernesto; MARTINEZ, -  
Frias Hector F.  
La Formulación y Evaluación Técnico - Económica de Proyectos -  
Industriales.  
Editorial CENETI, 2a. Edición.  
México, 1978.
- 39.- STACY, R.E.; THORN, I.A.  
Twenty-five Years of Operation at Wairakei Geothermal Power --  
Station.  
Geothermal Resources Council, Bulletin february 1984.  
Publicado por el IIE en la Referencia E608.
- 40.- TARQUIN, Anthony T.  
Ingeniería Económica.  
Ediciones Mc. Graw-Hill.  
México, 1976.
- 41.- TODD, J.H.; CRANE, H. Christopher.  
Economic Analysis of Geothermal Modular Wellhead Units. Preli  
minary Results.  
Geothermal Resources Council, Conference on Resources Evalua -  
tion and Power Plant Selection.  
Long Beach, California, July 25-27, 1983.
- 42.- VACA, Carraro Jaime.  
Análisis de Pruebas de Presión en Pozos Geotérmicos.  
Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.  
México, 1981.

- 43.- VETTER, O.J.  
Solid Waste Problems in Geothermal Operations.  
Society of Petroleum Engineers (SPE).  
Ventura, California, U.S.A., march 23-25, 1983.
- 44.- WHITEBECK, Ed., J.F.  
Heat Cycle Research Experimental Program.  
Geothermal Program Review III, El Centro, Ca.  
Proceedings, Springfield, VA:NTIS, 1984.

Es un buen libro aquel que se abre con expectación y se cierra con provecho.

- Alcott -

CAP. XVI) CONCLUSIONES DEL TRABAJO.

Durante la primera parte de este trabajo, dedicada a la energía, se mostró que el consumo de la misma ha ido aumentando con el transcurso del tiempo, y como seguirá incrementándose irremediablemente conforme la humanidad siga progresando; esto es así debido a que los implementos creados por las civilizaciones son tanto más consumidores de energía cuanto más evolucionados, mostrándose también las perspectivas a futuro y estableciéndose, por lo consiguiente, la dependencia cada vez mayor del hombre de los energéticos.

Por otra parte, se ha dejado claro que existe una estrecha relación entre la economía y el consumo energético, mostrándose su importancia y repercusiones, y exhibiéndose cómo los bajos precios de la energía propician ineficiencia e irracionalidad en su uso.

Adicionalmente, se dejó bien establecido que el consumo energético mundial depende en demasía (aproximadamente en un 80%) de tan solo tres energéticos, que son el petróleo, el gas natural y el carbón, los cuales, por otra parte, son recursos escasos y no renovables. Por ello se enfatizó en la imperiosa necesidad de tomar medidas que permitan ahorros de energía y un uso más eficiente de la misma, recalcoándose además la importancia que tiene la diversificación de las fuentes de energía, y el interés que presenta lograr que estas sean, en lo posible, renovables y lo menos contaminantes.

Posteriormente se presentaron todas las alternativas de que dispone la humanidad para la producción de la energía necesaria para satisfacer sus crecientes necesidades.

Para todos los casos tratados en esta parte, se hizo -- un pequeño paréntesis para tratar el caso de México, estudiándose su situación actual y perspectivas futuras. Se patentizó que la dependencia del país con respecto a los hidrocarburos es todavía más drástica que la mundial, ya que se depende de ellos en un 91%, aproximadamente, por lo que se ha insistido en la impostergable - necesidad de diversificar las fuentes de energía en México.

En el caso de las fuentes no convencionales, de las que se presentaron datos para México, se mostró de manera muy resumida su estado actual y posibilidades de desarrollo.

A la geotermia, como una de las fuentes de energía que puede contribuir de manera notable al esfuerzo mundial de diversificación de las mismas, se le dedicó la segunda parte del trabajo. En ella se definió lo que es geotermia, se habló de su origen y - del origen del vapor endógeno, y se discutió y trató de aportar - pruebas en pro de la teoría de la renovabilidad de esta fuente, - mencionándose también los argumentos que se oponen a la misma. Se mostraron los elementos necesarios para la existencia de un campo geotérmico hidrotermal, y se vió la evolución que ha sufrido la geotermia al paso de los años, partiendo de los usos en baja entalpía y la obtención de minerales, a los usos en alta entalpía para la producción básicamente de electricidad, siendo la tendencia actual la de complementar esta última aplicación con las primeras, a fin de realizar el desarrollo de proyectos más equilibrados, racionales y eficientes.

Se mostraron las perspectivas de esta fuente de energía a nivel mundial, dejándose claro que aunque es difícil que contribuya con más del 1% del consumo mundial de energía para el año -- 2000, si representará, sin embargo, una cantidad muy importante de energía (y de ahorro de otros energéticos), misma que deberá tender a incrementarse sobre todo si se logran perfeccionar los desarrollos tendientes a lograr la explotación de los sistemas geotérmicos no convencionales (roca seca y caliente, zonas de alta presión, masas de magma, y geotermia submarina), mismos a los que se les dedica también una parte importante para estudiarlos y exponer su futuro.

Se ha mostrado adicionalmente el estado actual que guardan los usos en baja entalpía, y obtención de minerales, en todo el mundo. Finalmente se muestra la evolución, estado actual y -- perspectivas de la geotermia en México, dejándose claramente establecido que la geotermia representa el 3.2% de la producción actual de energía eléctrica, representando esta cifra un ahorro significativo de hidrocarburos. Se presentan también las zonas termales de la República, las reservas existentes y los planes futuros, los cuales deberán colocar a la geotermia mexicana en el segundo lugar mundial en capacidad instalada para 1994, mismo que -- deberá mantenerse por lo menos hasta el año 2000.

Se dejó establecido que el desarrollo de la geotermia -- forma parte del Plan Nacional de Energía, el cual tiene entre sus objetivos la diversificación de las fuentes de energía, determinándose las ventajas y desventajas de esta fuente, y mostrando el estado actual de explotación de los usos geotérmicos alternos en el país.

En la tercera y última parte del trabajo se muestra la metodología de desarrollo de un proyecto geotérmico integral, - esto es, en el que se aproveche al máximo toda la energía proveniente del vapor endógeno, a través de la producción de electricidad, calor, y de la obtención de minerales.

Durante esta tercera parte se pretendió mostrar el proceso que deberá seguirse en el desarrollo de cualquier proyecto; independientemente de si se trata de un campo sedimentario o ígneo, del tipo que lo realice, de la potencialidad del campo, etc.

Se trató de mantener, por otra parte, una secuencia lógica de desarrollo sin profundizar en los temas debido a la magnitud y - complejidad de cada uno de ellos, por lo que únicamente se trató de mostrar los puntos básicos de cada uno de los tópicos. Este proceso de desarrollo se inició en el estudio de mercado, continuando -- con la exploración y perforación exploratoria, perforación de los pozos de producción y reinyección, el análisis de sus características, la ingeniería básica y las evaluaciones económica y socioeconómica, la ingeniería de detalle, la construcción del campo, hasta llegar -- finalmente a la operación y mantenimiento de la planta y el campo.

Resumiendo, el autor espera haber podido ofrecer un panorama de la importancia de la energía en el mundo, las diferentes alternativas existentes para su producción y, enmarcado en ello, una visión más amplia de una de dichas alternativas, la geotermia, especificándose la manera en que puede aprovecharse dicha fuente a través del desarrollo de proyectos geotérmicos.

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS.

FIGURAS:

PRIMERA PARTE: LA ENERGIA.

I.1)	Relación entre el consumo energético y el PNB .....	6
I.2)	Evolución de la relación entre crecimiento de la demanda energética y el PNB en Estados Unidos .....	7
I.3)	Consumo de energía primaria por unidad de producto interno bruto en países seleccionados .....	9
I.4)	Relación entre los precios de la energía y la intensidad energética en varios países .....	10
I.5)	Espectro de radiaciones electromagnéticas .....	22
I.6)	Matriz de conversión de energía .....	25
I.7)	Consumo individual expresado en miles de kilojulios por día .....	31
I.8)	Producción mundial de carbón .....	33
I.9)	Producción mundial de petróleo crudo .....	33
I.10)	Esquema de la historia de la sustitución de la energía primaria en el mundo .....	35
I.11)	Evolución de la participación relativa de los distintos energéticos en la oferta de energía primaria al mercado nacional de México .....	37
I.12)	Composición de la oferta de energía primaria al mercado nacional .....	40

FIGURAS

I.13)	Variación de las propiedades y composición del carbón .	54
I.14)	Reservas mundiales de carbón .....	58
I.15)	Localidades carboníferas de la República Mexicana ....	63
I.16)	Estado actual de los reactores nucleares en base a su tipo .....	74
I.17)	Distribución espacial del potencial hidroeléctrico identificado y relación entre el potencial identificado y el teórico para cada cuenca .....	93
I.18)	Características y utilización de la turba para combustible .....	129
I.18A)	Zonas de acumulación de turba .....	132
I.19)	Sistemas energéticos de biomasa .....	154
I.20)	Procesos de conversión de la biomasa y productos que pueden obtenerse .....	155
I.21)	Tecnologías para el aprovechamiento directo de la energía solar .....	169
I.22)	Sistemas solares térmicos pasivos .....	173
I.23)	Algunos diseños de colectores planos .....	175
I.24)	Energía del viento disponible .....	186
I.25)	Potencia disponible media anual en la República Mexicana .....	202
I.26)	$\Delta T$ ( $^{\circ}C$ ) entre la superficie y 1000 m de profundidad para América y África .....	209
I.26A)	$\Delta T$ ( $^{\circ}C$ ) entre la superficie y 1000 m de profundidad para Asia y Oceanía .....	210
I.27)	Formas de energía a partir de la OTEC y sus subproductos	212
I.28)	Principales sitios con posibilidades maremotrices .....	216
I.29)	Bomba turbina de la planta maremotriz de La-Rance .....	219
I.30)	Promedio anual de potencia de las olas (KW/m), en costas y áreas seleccionadas mar adentro de Norte y Sud-América .....	222

FIGURAS

I.31)	Promedio anual de potencia de las olas (Kw/m), en costas y áreas seleccionadas mar adentro de Europa, Africa y Suroeste de Asia .....	223
I.32)	Promedio anual de potencia de las olas (Kw/m), en costas y áreas seleccionadas mar adentro de Asia del Este, Australia, Nueva Zelanda, Alaska e Islas del Pacifico .....	224
I.33)	Principales dispositivos de aprovechamiento de la energía de las olas .....	227
I.34)	Producción en MW con diversos tipos de energía oceánica ....	231
I.35)	Diagrama de un reactor de fusión Tokamak .....	236
I.36)	Planta nucleoelectrica de fusión .....	239
A.1)	Central termoeléctrica convencional .....	242
A.2)	Unidad diésel .....	244
A.3)	Unidad turbogas .....	246
A.4)	Central ciclo combinado .....	249
A.5)	Central carboceléctrica .....	251
A.6)	Central nucleoelectrica (LWR) .....	253
A.7)	Central geotermoeléctrica .....	255
A.8)	Central hidroeléctrica .....	257

## SEGUNDA PARTE: LA GEOTERMIA.

II.1)	Uso potencial de la energía geotérmica .....	318
II.2)	Regiones geotérmicas del mundo .....	322
II.3)	Planta potabilizadora a partir del vapor endógeno .....	346

FIGURAS

II.4)	Localización de zonas térmicas de la República Mexicana .....	349
II.5)	Reconocimiento de zonas térmicas en la República Mexicana .....	350
II.6)	Provincias geotérmicas de la República Mexicana .....	356
II.7)	Comparación gráfica de gastos totales anuales de centrales generadoras .....	372
II.8)	Usos de diversos elementos aprovechables de la salmuera geotérmica .....	392

## TERCERA PARTE : DESARROLLO DE UN PROYECTO GEOTERMIOLECTRICO.

III.1)	Métodos geofísicos más utilizados .....	427
III.2)	Equipo de Perforación con circulación de aire .....	456
III.3)	Equipo típico de perforación y terminación de un pozo geotérmico .....	457
III.4)	Esquema típico de una planta de condensación .....	498
III.5)	Esquema típico de una planta a contrapresión (vapor dominante) .....	499
III.6)	Esquema típico de una planta de flasheo simple .....	503
III.7)	Esquema típico de una planta de flasheo simple con bombeo en los pozos .....	505
III.8)	Esquema típico de una planta de doble flasheo .....	508
III.9)	Esquema típico de una planta a contrapresión (líquido dominante) .....	512
III.10)	Esquema típico de una planta de ciclo binario .....	522
III.11)	Principales tipos de máquinas de flujo total .....	524

FIGURAS

III.12)	Esquema típico de una planta combinada de flasheo/ciclo binario .....	525
III.13)	Separador ciclónico típico .....	562
III.14)	Dehumidificador típico .....	562
III.15)	Programa de conceptos principales .....	583
III.16)	Programa general de construcción .....	584
III.17)	Programa intermedio de construcción (montaje del turbogenerador) .....	586

TABLAS:

## PRIMERA PARTE: LA ENERGIA.

I.1)	Reservas estimadas de energía en el mundo .....	16
I.2)	Principales unidades de energía, trabajo y calor .....	26
I.2a)	Principales unidades de potencia .....	26
I.3)	Reservas probadas de petróleo crudo en el mundo .....	47
I.4)	Reservas probadas de gas natural en el mundo .....	50
I.5)	Reservas probadas mundiales de carbón .....	56
I.6)	Recursos mundiales adicionales .....	57
I.7)	Reservas mundiales recuperables .....	57
I.8)	Recursos mundiales razonablemente asegurados de uranio ...	70
I.9)	Recursos mundiales adicionales estimados de uranio .....	71
I.10)	México, reservas estimadas de $U_3O_8$ .....	80
I.11)	Potencial hidroeléctrico mundial .....	87
I.12)	Resumen del potencial hidroeléctrico identificado de Mé -- xico .....	91
I.13)	Potencial hidroeléctrico identificado por entidad federati- va .....	92
I.14)	Población con déficit de madera .....	98
I.15)	Los combustibles de madera en el consumo mundial de ener -- gía en 1978 .....	101
I.16)	Eras geológicas de la tierra .....	112
I.17)	Recursos mundiales de lutitas bituminosas .....	120
I.18)	Características y utilización de la turba para combusti -- ble .....	129

TABLAS

I.19)	Estimación actual de la superficie total (original) de turberas en diferentes países en 1980 .....	133
I.20)	Producción mundial anual de biomasa .....	146
I.21)	Estado actual de desarrollo de las diferentes tecnologías - para aprovechar la biomasa energéticamente, según el origen de la misma .....	161

## SEGUNDA PARTE: LA GEOTERMIA.

II.1)	Recursos geotérmicos mundiales .....	280
II.2)	Temperatura aproximada de los fluidos geotérmicos necesaria para distintas aplicaciones .....	317
II.3)	Capacidad instalada acumulada obtenida de energía geotérmica .....	328
II.4)	Capacidad instalada de energía geotérmica de baja temperatura .....	337
II.5)	Estado actual en la recuperación de minerales de los fluidos geotérmicos .....	338
II.6)	Relación de focos termales por estados de la República Mexicana .....	352
II.7)	Potencia instalada en México .....	354
II.8)	Costos estimados de generación eléctrica para nuevas plantas .....	371
II.9)	Costo unitario de generación según distintas tecnologías ..	372
II.10)	Impacto al medio ambiente de diversas fuentes de energía ..	375
II.11)	Factores de planta y eficiencias de diversos tipos de planta .....	378

TABLAS

## TERCERA PARTE: DESARROLLO DE UN PROYECTO GEOTERMIOELECTRICO.

III.1)	Principales geotermómetros químicos utilizados en la actualidad .....	430
III.2)	Diferencias básicas entre diversos tipos de pozos geotérmicos .....	438
III.3)	Análisis químico del vapor y agua geotérmicos de diversos campos en el mundo .....	489
III.4)	Características de algunos campos geotérmicos en el mundo .....	490
III.5)	Aplicación de los materiales en los equipos principales .....	554
III.6)	Clasificación de las torres de enfriamiento .....	558