



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**FACTIBILIDAD DE UN PROYECTO GEOTERMOELÉCTRICO PARA LA ZONA DE SAN  
MARCOS JALISCO**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO  
MECÁNICO**

PRESENTA:

**CÉSAR GODÍNEZ HUERTA**

Director de Tesis: M. en I. Héctor Miguel Aviña Jiménez.

México D.F. Junio 2013



---

## *Agradecimientos*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México*

*Por los conocimientos y experiencias que en ella aprendí.*

### *A mi Familia*

*A mi Madre Rosa E. por brindarme su cariño y comprensión, a mi padre Víctor por su mano firme, por darme las bases que sustentan mi existencia.*

*A mis hermanos Grisel, Víctor, Roberto, mis Abuelos, a Tere y a todos con los que he compartido durante este tiempo me han brindarme su apoyo y confianza.*

### *Ing. Adriana*

*Por tu cariño, paciencia, amor, entrega, por ser un apoyo incondicional, por la ayuda recibida para realizar este trabajo, por todos los momentos que hemos compartido.*

### *A ENAL*

*Al Dr. Gerardo Hiriart por las enseñanzas y oportunidades recibidas.*

*Al Ing. Salvador Espíndola por creer en mí, por el apoyo y la confianza.*

*A todos los compañeros que me han ayudado y apoyado en esta etapa.*

*A todas las personas que directa o indirectamente me ayudaron en este trabajo.*

*Gracias*

## RESUMEN

En el presente estudio se evalúa la viabilidad técnica y económica de instalar una planta geotérmica en la zona de San Marcos, Jalisco. Por medio de la estimación del potencial geotérmico y el cálculo del costo nivelado de generación (CNG).

Para evaluar la viabilidad técnica, se calculó el potencial a instalar en la zona. Se llegó a la posible instalación de 21 MW para la zona de San Marcos, utilizando el método volumétrico del United States Geological Survey ( USGS por sus siglas en ingles).

Para el caso de la economía del proyecto, se evaluó el costo nivelado de generación con el cual se hizo una comparación con los costos actuales de generación de México, sin embargo, no se tomaron en cuenta los factores externos, que podrían afectar los costos y por tanto el cálculo del costo nivelado. El CNG obtenido en el estudio es de 7.13 ¢USD/kWh.

El estudio indica que la creación de una planta geotérmica en la zona de San Marcos, Jalisco, es viable en teoría técnica y económicamente, aunque se sabe que todo estudio de potencial geotérmico tiene un grado de incertidumbre.

### OBJETIVO DE LA TESIS:

Determinar la factibilidad de poner en operación un campo geotérmico en la zona de San Marcos Jalisco, mediante la estimación del potencial geotérmico y evaluación económica, definiendo el costo nivelado de generación.

**ÍNDICE**

RESUMEN.....	i
ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE TABLAS.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
NOMENCLATURA.....	iv
INTRODUCCIÓN.....	v
1 CAPÍTULO I.- GEOTERMIA.....	2
1.1 Introducción .....	2
1.2 Geotermia .....	2
1.3 Historia de la geotermia .....	2
1.4 Geotermia en el mundo .....	4
1.5 Geotermia en México.....	8
1.6 Cómo funciona la geotermia .....	10
1.7 Tipos de Sistemas Geotérmicos .....	11
1.8 Central geotérmica.....	14
1.9 Clasificación de la energía geotérmica.....	15
1.9.1 Geotermia de baja, media y alta entalpia .....	16
1.10 Tipos de tecnologías de generación geotérmica.....	17
1.10.1 Ciclo a contrapresión.....	18
1.10.2 Ciclo a condensación .....	18
1.10.3 Sistemas de ciclo binario .....	19
2 CAPÍTULO II.- ETAPAS Y COSTOS DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO .....	22
2.1 Introducción .....	22
2.2 Exploración .....	22
2.2.1 Técnicas Geológicas.....	23
2.2.2 Técnicas Geofísicas.....	24
2.2.3 Técnicas Geoquímicas .....	24
2.2.4 Perforación Exploratoria de Diámetro reducido .....	26
2.3 Resultados de la Campaña exploratoria.....	26
2.4 Perforación exploratoria .....	26
2.5 Descripción básica de las instalaciones típicas de una central .....	27
2.5.1 Pozos .....	27

---

2.5.2	Tuberías para el transporte de fluidos .....	29
2.5.3	Separador centrífugo .....	30
2.5.4	Secadores de humedad .....	30
2.5.5	Silenciadores .....	30
2.5.6	Turbina .....	31
2.5.7	Condensador .....	32
2.5.8	Torre de enfriamiento .....	32
2.5.9	Elementos de seguridad .....	32
3	<b>CAPÍTULO III.- EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO EN LA ZONA DE SAN MARCOS JALISCO</b> .....	34
3.1	Introducción .....	34
3.2	San Marcos Evangelista .....	34
3.3	Evaluación del potencial.....	36
3.4	Algunos Métodos para la estimación de potencial.....	36
3.5	Definición de los escenarios para la evaluación del potencial.....	38
3.6	Tabla de resultados .....	40
4	<b>CAPÍTULO IV.- EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO GEOTÉRMICO</b> .....	43
4.1	Introducción .....	43
4.2	Costo nivelado de generación .....	43
4.3	Metodología del Costo nivelado de generación .....	45
4.4	Costos Estimados para el proyecto geotermoeléctrico .....	46
4.5	Calculo del Costo nivelado .....	48
5	<b>CAPÍTULO V.-CONCLUSIONES</b> .....	52
	<b>ANEXOS</b> .....	54
	<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS</b> .....	57

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1.- Capacidad geotérmica mundial neta instalada para la generación de energía eléctrica (2010) .....	5
Tabla 2.- Evolución de la capacidad geotérmica instalada.....	6
Tabla 3.- Evolución histórica de la generación de electricidad por geotermia 1996-2008.....	7
Tabla 4.- Potencial Estimado para México 2011 .....	8
Tabla 5.- Capacidad efectiva instalada por tipo de generación al mes de septiembre de 2011 .....	9
Tabla 6.- Generación por fuente .....	9
Tabla 7.- Capacidad Geotérmica efectiva instalada en México (2011).....	10
Tabla 8.- Clasificación según su temperatura .....	15
Tabla 9.- Parámetros y Escenarios para la estimación del potencial geotérmico.....	39
Tabla 10.- Resultados .....	40
Tabla 11.- Costo de generación por tecnología .....	44
Tabla 12.- Costos aproximados para el proyecto.....	48
Tabla 13.- Datos supuestos para el costo nivelado de generación.....	48
Tabla 14.- Resultados de los costos nivelados de generación .....	50

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1.- Planta de extracción de boro.....	3
Figura 2.- Turbogenerador de 250 kW.....	4
Figura 3.- Diagrama de las placas oceánicas y continentales.....	5
Figura 4.- Aplicaciones de uso directo de la geotermia en el mundo.....	6
Figura 5.- Esquema de un reservorio geotérmico.....	11
Figura 6.- Sistema de roca caliente.....	12
Figura 7.-Representación de un sistema geopresurizado en Texas.....	13
Figura 8.-Sistema de generación propuesto para una ventila hidrotermal.....	13
Figura 9.-Nevado de Colima México.....	14
Figura 10.- Central de generación geotérmica “Los Azufre” CFE.....	15
Figura 11.- Calefacción por Geotermia.....	16
Figura 12.- Geotermia.....	17
Figura 13.- Ciclo a contrapresión.....	18
Figura 14.- Ciclo a condensación.....	19
Figura 15.- Ciclo Binario.....	20
Figura 16.- Geología superficial de la ciudad de Pátzcuaro, Michoacán.....	23
Figura 17.- Resultados Obtenidos de una tomografía eléctrica.....	24
Figura 18.- Muestreo geoquímico.....	25

Figura 19.- Pozo de gradiente.....	25
Figura 20.- Integración de técnicas para el modelo geotérmico inicial.....	26
Figura 21.- Equipo de perforación.....	27
Figura 22.- Diagrama de un pozo tipo geotérmico.....	28
Figura 23.- Pozo Mina Cerro Blanco.....	29
Figura 24.- Tuberías para el transporte de fluidos geotérmicos, Los azufres CFE.....	29
Figura 25.- Separador centrífugo.....	30
Figura 26.- Silenciador portátil.....	31
Figura 27.- Turbina.....	31
Figura 28.- Torre de enfriamiento.....	32
Figura 29.- Ubicación geográfica de San Marcos, Jalisco.....	35
Figura 30.-Localización de manifestaciones termales.....	35
Figura 31.- Prueba PTS .....	40
Figura 32.- Costos de Proyecto.....	47

## NOMENCLATURA

United States Geological Survey	USGS
Presión Temperatura Spinner	PTS
Comisión Federal de Electricidad	CFE
Centro de Investigación en Energía	CIE
kilo Watts hora	kWh
Mega Watts	MW
Mega Watts Eléctricos	MWe
Grados Celsius	°C
Operación y Mantenimiento	O&M
Centavo de dólar americano	¢USD

## INTRODUCCIÓN

La energía geotérmica es un recurso renovable, debido a que el calor de la tierra es considerado como infinito y cada vez que se extrae será restaurado de forma continua, siempre y cuando se tenga un buen manejo del recurso geotérmico, puesto que el fluido que transportará el calor hacia la superficie no es infinito. México se encuentra en un lugar privilegiado para la generación de energía geotérmica, un ejemplo de ello es la central en la zona de Cerro Prieto en Mexicali, el cual es el segundo campo más importante del mundo y el más importante de México.

El aprovechamiento de la energía geotérmica inicia con fines domésticos, posteriormente su aprovechamiento industrial empezó a fines del siglo XIX y ha ido evolucionado constantemente.

En esta tesis se presentan los resultados de un estudio y análisis preliminar para la estimación del potencial geotérmico, así como la evaluación económica para la zona de San Marcos ubicada en el estado de Jalisco, México. Se decidió por la zona de San Marcos debido a que existen manifestaciones geotérmicas superficiales, además de que previamente ya se habían realizado estudios geológicos y geofísicos en la zona para estimar su potencial; lo que dio las bases para realizar este estudio. Para realizar la estimación del potencial geotérmico se utilizó el método volumétrico United States Geological Survey (USGS por sus siglas en inglés), el cual con pocos datos nos permite hacer una estimación preliminar del potencial geotérmico. La evaluación económica se realizó mediante el costo nivelado de generación y se comparó con algunos costos de generación para México y parte del mundo.

La tesis se encuentra dividida en cinco capítulos, en el primero denominado **Geotermia** se dan las bases teóricas geotérmicas, donde se dará una breve explicación de lo que es la geotermia en términos generales. Su historia de aplicaciones en el mundo y en México, donde se conocerá su situación actual, la aportación a la generación de energía del País y el mundo, así como, la estimación probable del potencial geotérmico en México. También se mostrará la clasificación según su temperatura, los usos más comunes y las diferentes tecnologías de generación.

En el capítulo dos, denominado **Etapas y Construcción de un Proyecto Geotermoeléctrico**, se describen los estudios y etapas que se deberán cumplir para conocer la zona a explotar, y así, evaluar si resulta técnicamente factible la instalación de una central.

Se abordará una breve descripción de los equipos típicos en una central geotérmica, tales como: El pozo, las tuberías, torre de enfriamiento, entre otros.

En el Tercer capítulo **Evaluación del potencial geotérmico en la zona de San Marcos Jalisco**, se estimó el potencial geotérmico instalable probable para la zona de estudio mediante el modelo volumétrico USGS.

Para el cuarto capítulo **Evaluación económica del proyecto geotérmico**, se presentará una manera fácil de comparar y evaluar los costos de generación, se determinó el costo nivelado de generación para el proyecto, con éste se podrá evaluar la viabilidad económica del proyecto, haciendo una comparación con los costos reportados por instituciones nacionales e internacionales.

Para el quinto capítulo en el cual se dan **Conclusiones**, se presentan los resultados de los cálculos de la evaluación económica, así como el potencial geotérmico y se podrá determinar la viabilidad económica y técnica de la instalación de una planta de generación en la zona de San Marcos, Jalisco.

### **Justificación**

El presente trabajo es una revisión de las etapas para la instalación de un proyecto geotermoeléctrico en México. Debido a la apertura eléctrica que existe en México y con la reciente legislación energética es primordial que se tenga estudios de factibilidad económica para nuevos campos geotérmicos ya que la iniciativa privada ha mostrado interés en este tipo de generación eléctrica para autoconsumo. En este estudio se dan las bases generales para realizar un proyecto geotermoeléctrico, a través de la estimación del potencial de generación eléctrica instalable en la región de San Marcos, Jalisco, y el cálculo preliminar del costo nivelado de generación para una central de 21 MW.

La geotermia es una de las energías renovables con mayor madurez dentro del país, México se encuentra en cuarto lugar a nivel mundial en capacidad instalada. A diferencia de la energía solar o la eólica, la energía geotérmica no depende de las condiciones climatológicas para poder operar continuamente ya que puede operar alrededor de un 97% del tiempo. La generación de electricidad mediante la geotermia evita el consumo de energéticos petrolíferos. La disminución de las reservas convencionales de petróleo constituye un motivo de preocupación, ya que el proceso de producción resulta cada vez más difícil y costoso. En México aproximadamente el 80% de la generación eléctrica proviene de combustibles fósiles. Las emisiones de los gases de efecto invernadero y el calentamiento global atribuido al sector de la energía, han provocado cambios en los sistemas climáticos con consecuencias graves para la población de planeta. Será necesario satisfacer la demanda de electricidad sin la menor contaminación posible para poder tener un desarrollo sustentable.

# CAPÍTULO I

# GEOTERMIA

## **CAPÍTULO I.- GEOTERMIA**

### **1.1 Introducción**

En este capítulo definiremos a la energía geotérmica, sus características, el tipo de centrales de generación que existen, un poco de la historia de esta y el lugar que ocupa México en el mundo. Además del potencial instalable en el país.

### **1.2 Geotermia**

La energía geotérmica se refiere al aprovechamiento de la energía térmica que es generada del calor acumulado en el interior de la Tierra, este calor principalmente es utilizado para la generación de energía eléctrica. Se pueden mencionar algunas otras aplicaciones de este recurso geotérmico entre las cuales se encuentran: usos industriales como el secado de madera, usos recreativos como balnearios, usos domésticos como la calefacción entre otros.

### **1.3 Historia de la geotermia**

Desde tiempos pasados la geotermia ya era usada por el hombre, un ejemplo de esto, fueron los romanos y los griegos que utilizaron esta energía como calefacción. La primera vez que se tiene registro de que la geotermia se utilizó para fines comerciales fue en 1777 cuando F.U. Hoefer, director de la farmacia del Ducado de Toscana (Italia), descubrió la presencia de ácido bórico en los condensados del vapor geotérmico que se desprendían de forma natural en una zona de la región toscana, cerca de Monterotondo. El ácido bórico es una sustancia que tiene muchas aplicaciones, además de usarse en la medicina como antiséptico, se emplea en la industria del vidrio y en la fabricación de pinturas y de cerámica por mencionar algunas de las aplicaciones.

En 1818, Francesco Larderel comenzó la actividad extractiva del ácido bórico con una pequeña fábrica que evaporaba el agua termal bórica quemando leña, con el fin de recuperar el concentrado bórico. Larderel decidió hacer uso del vapor de agua que brotaba de la tierra, cubriendo el brote de vapor con mampostería y conduciéndolo hasta su planta en donde lo utilizaba para sustituir la costosa leña y así poder extraer el boro.

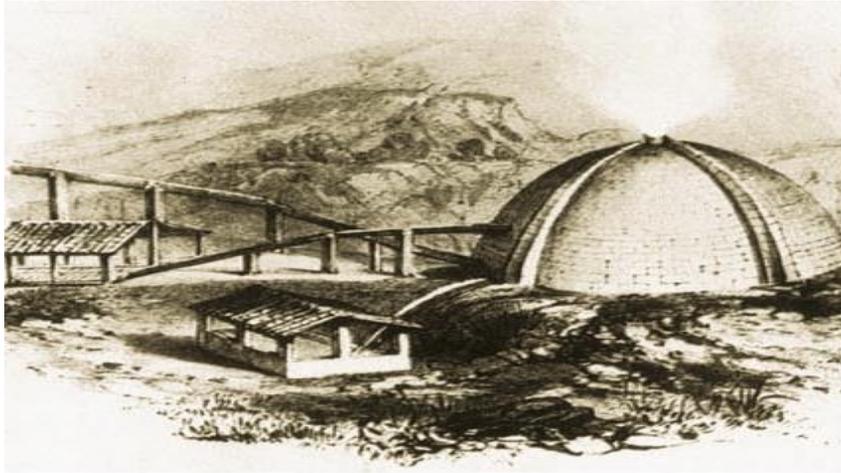


Figura 1.- Planta de extracción de boro<sup>1</sup>

Posteriormente inició la perforación de rudimentarios pozos a poca profundidad para poder extraer el boro, en un principio la producción de boro era de 50 toneladas anuales, diez años después llegó a 800 toneladas incrementando su producción y el número de plantas.

En 1894 se dio la primera aplicación de la geotermia como uso para la generación de potencia, el doctor Ferdinando Reynaut utilizó un cambiador de calor para lograr aprovechar el vapor de los pozos y evaporar agua limpia que haría funcionar una máquina de émbolo de 9 caballos de fuerza. Aunque la instalación no persistió por más tiempo debido a la corrosión que sufrió el cambiador de calor.

La primera aplicación geotermoeléctrica de la historia fue en 1904 cuando el príncipe Piero Ginori Conti utilizó directamente el vapor geotérmico para alimentar una máquina de  $\frac{3}{4}$  de caballo que accionaba un generador de corriente directa, la electricidad producida se usó en la iluminación de la planta de Larderello que se pondría en construcción ese mismo año y entraría en funcionamiento en 1913 con un turbogenerador de 250 kW<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> <http://quimica-ie-2011.wikispaces.com/ENERG%C3%8DA+GEOT%C3%89RMICA>

<sup>2</sup> Quijano, José Luis., (2007) "**Manual de Geotermia**". Ciencias de la Tierra e Ingeniería de Reservorios

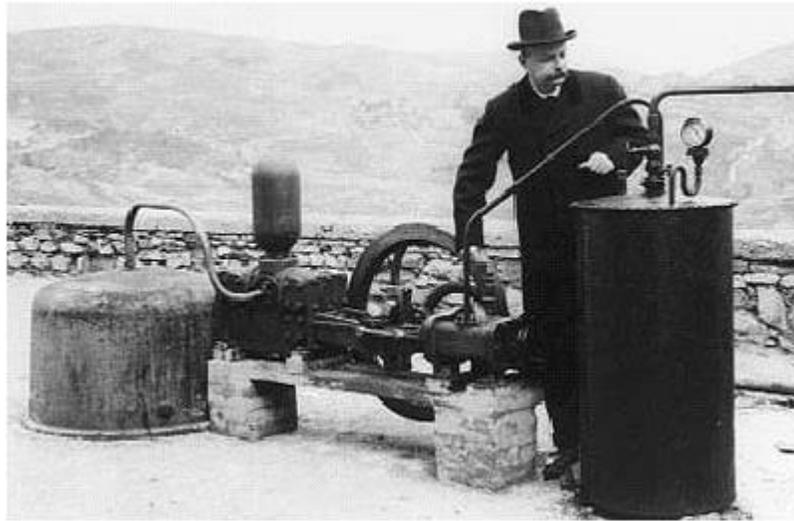


Figura 2.- Turbogenerador de 250 kW<sup>3</sup>

#### 1.4 Geotermia en el mundo

Italia marco el punto de partida comercial para la energía geotérmica, algunos países comenzaron la perforación de pozos. En 1919 Japón perforó los primeros pozos en Beppu, posteriormente en 1921 EE.UU en los Geysers, California. Para 1958 Nueva Zelanda puso en operación una pequeña planta. En 1942 la capacidad Geotermoélectrica instalada era de 127,650 kWe. Actualmente la geotermia ha avanzado mucho en cuanto a tecnologías de generación y por consecuencia la capacidad geotermoeléctrica ha cambiado<sup>4</sup>.

En la siguiente tabla se pueden observar algunas cifras interesantes que reflejan la importancia que actualmente tiene el uso de esta energía alternativa, el dato clave que podemos destacar de esta tabla, es el caso de México en donde es fácil observar que por encima de algunos países de primer mundo, deja en claro que en materia de energía geotérmica tiene avances significativos. La posición que ocupa a nivel mundial se debe en parte al número de fuentes geotérmicas que posee, a su exploración, explotación y al aprovechamiento que se le da a este recurso.

---

<sup>3</sup> <http://geothermgeek.wordpress.com/historia/>

<sup>4</sup> Quijano, José Luis., (2007) "**Manual de Geotermia**". Ciencias de la Tierra e Ingeniería de Reservorios

País	MW	Participación (%)
<b>Total</b>	<b>10,716</b>	<b>100</b>
<b>1. EUA</b>	3,093	28.9
<b>2. Filipinas</b>	1,904	17.8
<b>3. Indonesia</b>	1,197	11.2
<b>4. México</b>	958	8.9
<b>5. Italia</b>	843	7.9
<b>6. Nueva Zelanda</b>	628	5.9
<b>7. Islandia</b>	575	5.4
<b>8. Japón</b>	536	5.4
<b>9. El Salvador</b>	204	1.9
<b>10. Kenia</b>	167	1.6
<b>11. Costa Rica</b>	166	1.5
<b>Resto del mundo</b>	445	4.1

Tabla 1.- Capacidad geotérmica mundial neta instalada para la generación de energía eléctrica (2010)<sup>5</sup>

La información que se presenta en la tabla 2 nos refleja la evolución de la capacidad geotérmica en el periodo de 1990-2010. En todos los casos las cifras aumentan en función de cómo transcurren los años. Como los sistemas geotérmicos se forman preferentemente en los bordes entre placas tectónicas (ver figura 3), donde también suelen ocurrir fenómenos de vulcanismo y sismicidad, los países ubicados cerca de esos sitios son los que poseen más recursos geotérmicos.



Figura 3. Diagrama de las placas oceánicas y continentales

<sup>5</sup> Secretaría de Energía “Prospectiva del sector eléctrico 2010-2025” México

País	1990	1995	2000	2005	2010	Variación 05 - 10 (%)
El Salvador	95	105	161	151	204	0.26
Islandia	44	50	170	322	573	0.43
Indonesia	144	309	589	797	1.197	0.33
Italia	545	631	785	790	843	6,7%
Japón	214	413	546	535	536	0,1%
Kenia	45	45	45	127	167	0.24
México	700	753	455	953	958	0,5%
N. Zelanda	283	286	437	435	628	30,7%
Filipinas	891	1.227	1.909	1.931	1.904	-1,4%
USA	2.774	2.816	2.228	2.544	3.093	17,7%
<b>Total</b>	<b>5.831</b>	<b>6.833</b>	<b>7.974</b>	<b>9.064</b>	<b>10.715</b>	<b>15,5%</b>

Tabla 2.- Evolución de la capacidad geotérmica instalada<sup>6</sup>

Existe una gran variedad de usos que se le pueden asociar a la energía geotérmica, en el siguiente gráfico se puede observar de manera porcentual la aplicación del uso directo de esta energía.

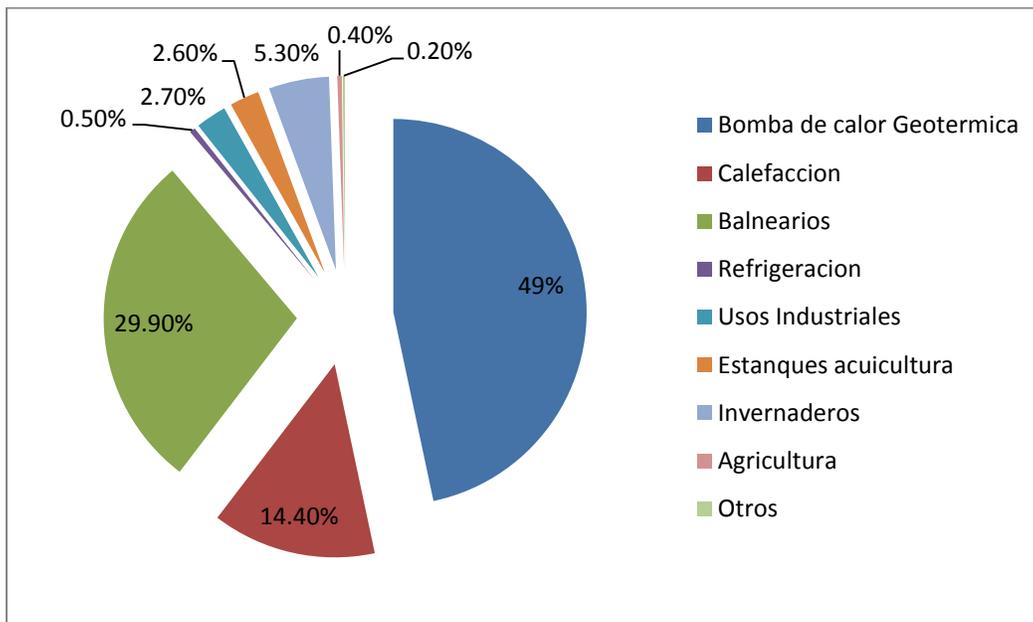


Figura 4.- Aplicaciones de uso directo de la geotermia en el mundo (2010)<sup>7</sup>

<sup>6</sup> International Geothermal Association (IGA).

<sup>7</sup> International Geothermal Association (IGA).

Generalmente podemos encontrar distintas maneras de producir energía eléctrica, sin embargo, hoy en día se ha tomado un gran interés por las fuentes alternas de energía, destacando así la energía geotérmica como una de ellas por ser continua, confiable y económicamente competitiva. En la siguiente gráfica se presenta la evolución que ha tenido la geotermia como una herramienta más para producir electricidad.

El incremento anual no es muy elevado, sin embargo la aportación total que genera la geotermia es notable.

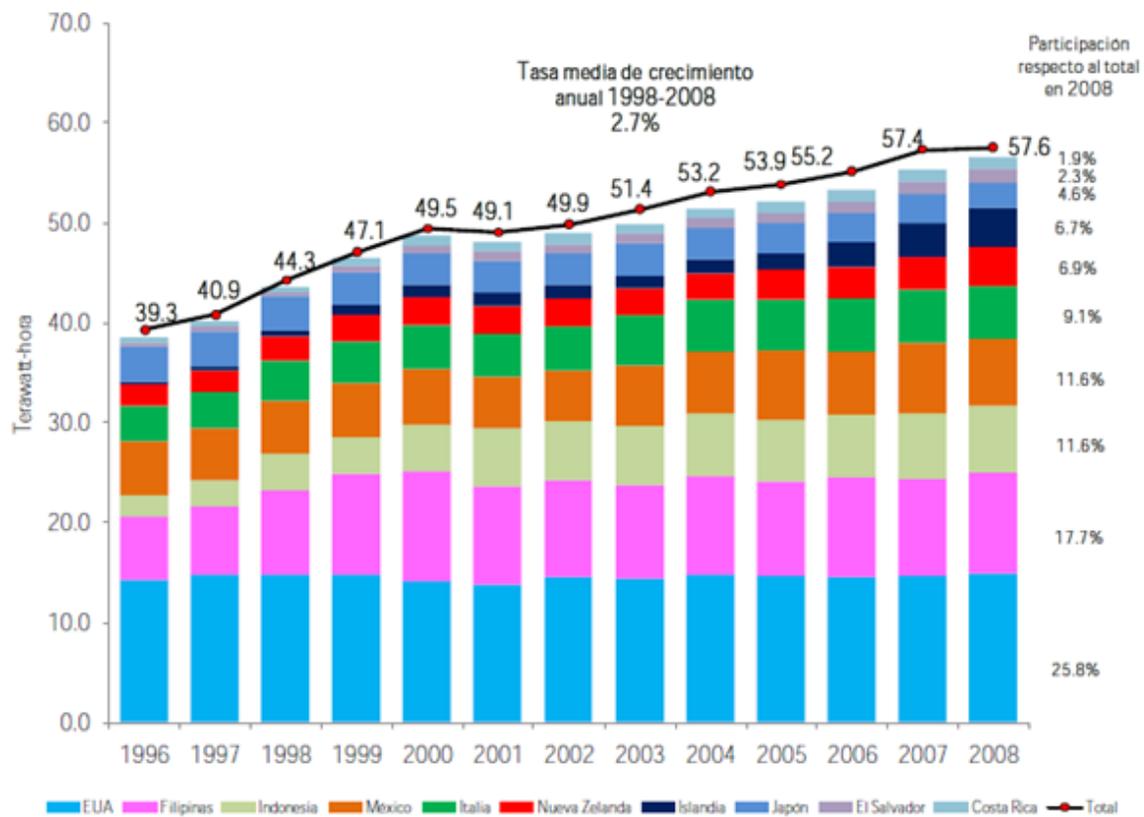


Tabla 3.- Evolución histórica de la generación de electricidad por geotermia 1996-2008<sup>8</sup>

<sup>8</sup> International Energy Statistics, U.S Department of Energy

## 1.5 Geotermia en México

El 4 de mayo de 1955 se forma la Comisión de Energía Geotérmica, posteriormente se inicia la perforación del primer pozo en “Pathé” ubicada en el estado de Hidalgo, el 14 de enero de 1956 brota vapor del pozo, alcanzando una profundidad de 238m, con una temperatura de 156°C; se continuo la perforación de varios pozos con buenos resultados<sup>9</sup>. Para noviembre de 1959 se decidió instalar la primera planta geotermoeléctrica de América Latina. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) para el año del 2010, estima reservas geotérmicas de alta temperatura 12 GW (reservas probadas 1.3 GW, probables 4.6 GW y posibles 6 GW)<sup>10</sup>

Para mayo de 2011 el Dr. Gerardo Hiriart realizó una estimación probable para algunas de las zonas con potencial geotérmico, las cuales se muestran en la tabla 4.

Zona geotérmica	Estado	Potencial estimado en MW		
		Modelo volumétrico*		Modelo de descompresión
		Valor probable	Rango (90%)	
1. La Soledad	Jalisco	52	10 – 94	51
2. Las Planillas	Jalisco	70	26 – 113	83
3. Pathé	Hidalgo	33	6 – 61	49
4. Araró	Michoacán	21	5 – 37	32
5. Acolulco	Puebla	107	38 – 177	48
6. Ixtlán de los Hervores	Michoacán	17	0 – 23	15
7. Los Negritos	Michoacán	24	3 – 44	20
8. Volcán Ceboruco	Nayarit	74	34 – 113	50
9. Graben de Compostela	Nayarit	105	35 – 175	110
10. San Antonio El Bravo (Ojinaga)	Chihuahua	27	10 – 43	36
11. Maguarichic	Chihuahua	1	0.2 – 1.7	1
12. Puruándiro	Michoacán	10	3 – 17	12
13. Volcán Tacaná	Chiapas	60	21 – 99	52
14. El Orito-Los Borbollones	Jalisco	11	1 – 21	9
15. Santa Cruz de Atistique	Jalisco	12	2 – 22	13
16. Volcán Chichonal	Chiapas	46	9 – 84	45
17. Hervores de la Vega	Jalisco	45	20 – 71	45
18. Los Hervores-El Molote	Nayarit	36	12 – 59	17
19. San Bartolomé de los Baños	Guanajuato	7	3 – 12	9
20. Santiago Papasquiario	Durango	4	1 – 7	4
<b>Total</b>		<b>762</b>		<b>701</b>

Tabla 4.- Potencial Estimado para México 2011<sup>11</sup>

<sup>9</sup> Hernández Galan, José Luis (1985) “La energía de la Tierra” Instituto de investigaciones Eléctricas

<sup>10</sup> Secretaria de Energía (2010)

<sup>11</sup> Hiriart Le Bert, Gerardo. 2011 “Evaluación de la energía geotérmica en México” Reporte para el BID

En México la geotermia representa el 2.29% del total de generación eléctrica por fuente, sin embargo su enorme impacto puede ser mejor observado localmente, pues por ejemplo, el campo geotérmico de Cerro Prieto ubicado en Baja California, produce 46,37% de la electricidad distribuida en la entidad. Además de ser el segundo campo más grande del mundo.

Tipo de generación	Capacidad efectiva en [MW]	Porcentaje
<b>Termoeléctrica</b>	23,124.37	45.20%
<b>Hidroeléctrica</b>	11,210.90	21.90%
<b>Carboeléctrica</b>	2,600	5.10%
<b>Geotermoeléctrica</b>	886.6	1.70%
<b>Eoloeléctrica</b>	86.75	0.20%
<b>Nucleoeléctrica</b>	1,364.88	2.70%
<b>Termoeléctrica (Productores Independientes)</b>	11,906.90	23.30%
<b>Total</b>	51,180.40	100%

Tabla 5.- Capacidad efectiva instalada por tipo de generación al mes de septiembre de 2011<sup>12</sup>

Tipo de generación	Porcentaje
<b>Geotermia</b>	2.29%
<b>Carbón</b>	6.44%
<b>Nuclear</b>	3.38%
<b>Eólica</b>	0.03%
<b>Productores independientes</b>	31.20%
<b>Hidráulica</b>	11.96%
<b>Hidrocarburos</b>	44.70%

Tabla 6.- Generación por fuente<sup>13</sup>

<sup>12</sup> <http://www.cfe.gob.mx/QUIENESSOMOS/ESTADISTICAS/Paginas/Indicadoresdegeneraci%C3%B3n.aspx>

<sup>13</sup> <http://www.cfe.gob.mx/QUIENESSOMOS/ESTADISTICAS/Paginas/Indicadoresdegeneraci%C3%B3n.aspx>

La siguiente tabla nos muestra la capacidad instalada para México por la Comisión Federal de Electricidad para la generación de energía geotérmica.

Nombre de la central	Número de unidades	Fecha de entrada en operación	Capacidad efectiva instalada (MW)	Ubicación
Cerro Prieto I	5	12-Oct-73	30	Mexicali, Baja California
Cerro Prieto II	2	01-Feb-84	220	Mexicali, Baja California
Cerro Prieto III	2	24-Jul-85	220	Mexicali, Baja California
Cerro Prieto IV	4	26-Jul-00	100	Mexicali, Baja California
Humeros	8	30-May-91	40	Humeros, Puebla
Los Azufres	15	04-Ago-82	192	Cd. Hidalgo, Michoacán
Tres Vírgenes	2	02-Jul-01	10	Mulege, Baja California Sur

Tabla 7.- Capacidad Geotérmica efectiva instalada en México (2011)<sup>14</sup>

## 1.6 Cómo funciona la geotermia

Hay distintas maneras para aprovechar el calor de la tierra, sin embargo debido a anomalías geotérmicas, existen países los cuales cuentan con más recursos aprovechables como son: Estados Unidos, Filipinas, México, Italia, Japón, Indonesia, entre otros.

Se considera a la tierra de tipo volcánico, el calor natural se encuentra a grandes profundidades, dentro de la tierra existen zonas de debilitamiento, no muy profundas originadas por los grandes movimientos o acomodamientos de la tierra llamadas “fallas o fracturamientos” y que a través de ellas se desplazan grandes volúmenes de masa ígnea magmática, manifestándose en la superficie en forma de lava o productos piroclásticos, en algunas partes esa masa ígnea quedó atrapada y fue así que a través de muchos años empezó a liberar energía calorífica a las capas subyacentes, esta energía al tener contacto con un acuífero o manto de agua, absorbe una gran cantidad de energía calorífica dando como resultado la energía geotérmica, la cual puede llegar a la superficie a través de pequeñas fisuras o haciendo perforación de pozos geotérmicos.

La forma más utilizada para generar electricidad mediante Geotermia es perforar dos tipos de pozos, uno para extracción y otro para reinyección. El pozo que se utilizará para la extracción es de donde saldrá la mezcla de agua-vapor, la cual deberá ser separada para conducir solo el vapor para alimentar una turbina que transformará la energía mecánica en electricidad, el otro pozo se ocupa para reinyectar el agua al acuífero.

<sup>14</sup> <http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/estadisticas/listadocentralesgeneradoras/Paginas/Geotermoelectrica.aspx>

## Modelo geotérmico tipo

Un modelo geotérmico tipo está constituido por tres elementos principales y se ilustra en la figura 4

- Una fuente de calor: que se localice en proximidad al acuífero, la fuente de calor se relaciona con la presencia de intrusión magmática.
- Reservorio. Volumen de rocas permeables de donde el agua circundante extrae calor cubierto por rocas impermeables y conectado a una zona de recarga de agua.
- Un fluido geotérmico el cual es medio de transporte del calor, en la mayoría de los casos es agua de origen meteórico, que al ser calentada podrá o no formar una mezcla de agua vapor ó vapor seco, con alta presión y temperatura, que puede contener sustancias químicas y gases disueltos.

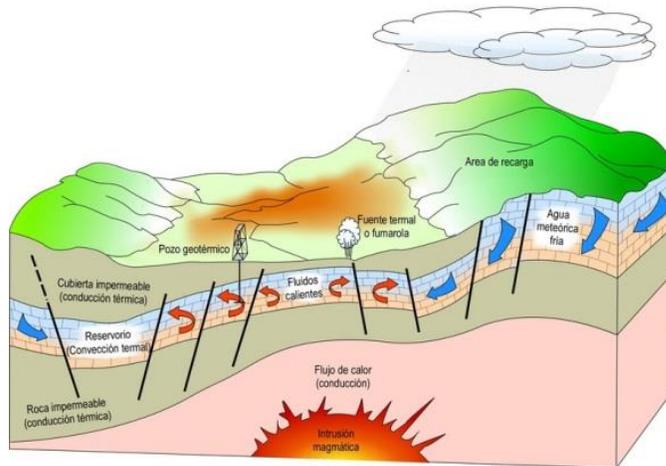


Figura 5. Esquema de un reservorio geotérmico<sup>15</sup>

## 1.7 Tipos de Sistemas Geotérmicos

A la fecha se han identificado cinco tipos de sistemas geotérmicos: hidrotermales; roca seca caliente; geopresurizados; marinos y magmáticos. A continuación se describen algunas de sus características:

### Sistemas Hidrotermales<sup>16</sup>

<sup>15</sup> [http://www.geothermal-energy.org/geothermal\\_energy/que\\_es\\_la\\_energia\\_geotermica.html](http://www.geothermal-energy.org/geothermal_energy/que_es_la_energia_geotermica.html)

<sup>16</sup> [www.iie.org.mx/geotermia/informe1.doc](http://www.iie.org.mx/geotermia/informe1.doc)

Estos sistemas están constituidos por: una fuente de calor, agua (líquido y/o vapor) y la roca en donde se almacena el fluido (Figura 4). El agua de los sistemas hidrotermales se origina en la superficie de la tierra en forma de lluvia, hielo o de nieve. Se infiltra lentamente en la corteza terrestre, a través de poros y fracturas, penetrando a varios kilómetros de profundidad en donde es calentada por la roca alcanzando en algunas ocasiones temperaturas de hasta 400 °C.

Estos sistemas pueden clasificarse en tres tipos principales: vapor dominante, líquido dominante alta entalpía y líquido dominante baja entalpía.

- Vapor Dominante. Son sistemas de alta entalpía, generalmente de vapor seco. Existen unos cuantos en el mundo.
- Líquido dominante (alta entalpía). Sistemas de salmuera súper caliente, con temperaturas entre 200 °C y más de 300 °C.
- Líquido Dominante (baja entalpía). Sistemas con salmuera caliente, con temperaturas entre de 100 °C y 200 °C aproximadamente.

### Sistemas de Roca Seca Caliente

Son sistemas rocosos con alto contenido energético pero con poca o ninguna agua, conocidos como HDR por sus siglas en inglés (Hot Dry Rock). No se explotan comercialmente en la actualidad. Este es probablemente uno de los recursos geotérmicos más abundantes. El U.S. Geological Survey ha estimado que la energía almacenada en los yacimientos de roca seca caliente que se encuentran dentro de los 10 kilómetros superiores de la corteza terrestre, equivale a más de 500 veces la energía acumulada en todos los yacimientos de gas y de petróleo del mundo.

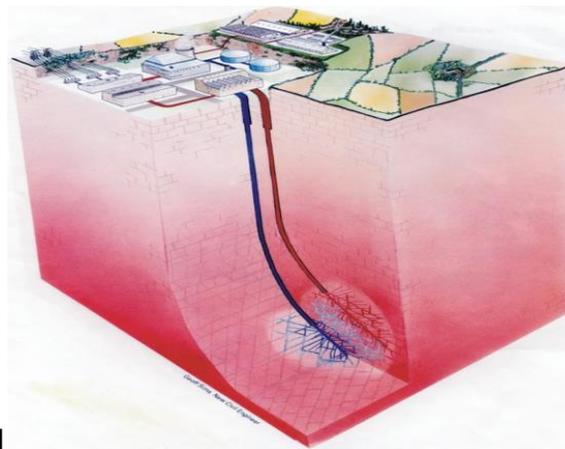


Figura 6. Sistema de roca caliente<sup>17</sup>

<sup>17</sup> [http://www.geothermal-energy.org/geothermal\\_energy/que\\_es\\_la\\_energia\\_geotermica.html](http://www.geothermal-energy.org/geothermal_energy/que_es_la_energia_geotermica.html)

## Sistemas Geopresurizados

Son sistemas que contienen agua y metano disuelto a alta presión (del orden de 700 bar) y mediana temperatura (aproximadamente 150 °C). Estos recursos ofrecen tres tipos de energía: térmica (agua caliente), química (metano) y mecánica (fluidos a muy alta presión).



Figura 7. Representación de un sistema geopresurizado en Texas

## Sistemas Marinos

Son sistemas de alta entalpía existentes en el fondo del mar. No se explotan comercialmente en la actualidad. En la figura 8 se presenta un esquema propuesto por el proyecto IMPULSA de la UNAM, el cual pretende aprovechar este tipo de recursos.

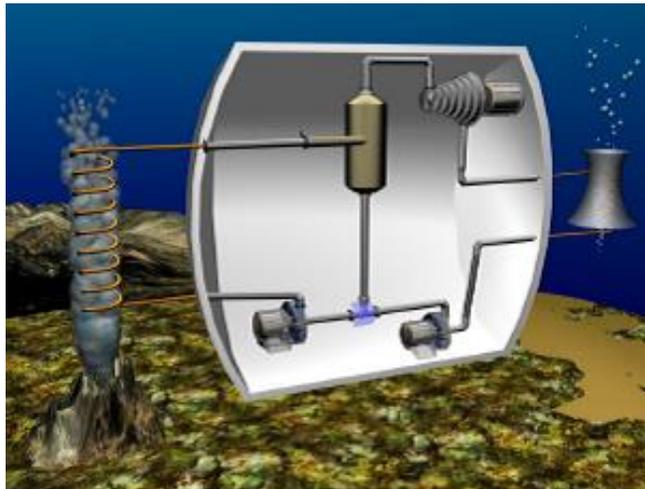


Figura 8. Sistema de generación propuesto para una ventila hidrotermal<sup>18</sup>

<sup>18</sup> Proyecto IMPULSA UNAM 2008

### **Sistemas Magmáticos.**

Son sistemas de roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos o a gran profundidad en zonas de debilidad cortical. No se explotan comercialmente en la actualidad. Ejemplo: Volcán de Colima (México), Volcán Mauna Kea (Hawaii).



Figura 9. Nevado de Colima México<sup>19</sup>

Posiblemente el atractivo más importante de este tipo de recurso sean las altísimas temperaturas disponibles ( $\geq 800$  °C). Recordemos que la eficiencia de las máquinas térmicas es proporcional a la temperatura máxima de su ciclo termodinámico.

### **1.8 Central geotérmica**

Una central geotérmica es similar a las centrales de generación por carbón, gas natural u algún otro combustible, estas centrales usan algún tipo de combustible para calentar el agua hasta evaporarse y así poder mover una turbina para generar electricidad. En una planta geotérmica se usa el vapor o agua que se calienta debido a diferentes fenómenos geológicos que existen dentro de la tierra.

---

<sup>19</sup> [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/82/Colima\\_Volcano\\_and\\_Nevado\\_de\\_Colima.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/82/Colima_Volcano_and_Nevado_de_Colima.jpg)



Figura 10. Central de generación geotérmica “Los Azufres” CFE

## 1.9 Clasificación de la energía geotérmica

### Clasificación según su temperatura

Para poder conocer el tipo de Central Geotérmica que se tendrá que instalar, se deberá de tomar en cuenta diversos parámetros que nos ayudaran en la toma de decisión, uno de ellos es la temperatura, la cual según esta, se considerará de baja, intermedia o alta entalpia de los fluidos geotermales. La entalpia es la cantidad de energía que un sistema termodinámico puede absorber o ceder, Expresa el contenido de calor ó Energía térmica de los fluidos geotermales.

Tipo de recurso		(a) [°C]	(b) [°C]	(c) [°C]	(d) [°C]	(e) [°C]
Entalpia	Baja	<90	<125	<100	≤150	≤190
	Intermedia	90-150	125-225	100-200	-	-
	Alta	>150	>225	>200	>150	>190

Tabla 8.- Clasificación según su temperatura<sup>20</sup>

<sup>20</sup> Dickson, Mary H. y Fanelli Mario **“Qué es la energía geotérmica”** Istituto di Geoscienze

- (a) Muffler and Cataldi(1978)
- (b) Hochstein(1990)
- (c) Benderitter and Cormy(1990)
- (d) Nicholson(1993)
- (e) Axelsson and Gunnlaugsson(2000)

### 1.9.1 Geotermia de baja, media y alta entalpia

#### Geotermia de baja entalpia

El recurso se encuentra generalmente entre los 25°C y los 90°C, generalmente el subsuelo acumula calor y mantiene una temperatura relativamente constante entre los 10 y 20 metros de profundidad a lo largo del año, esta energía puede ser utilizada para fines domésticos. Y a lo largo de la historia el hombre a usado la geotermia de baja entalpia para diferentes usos, principalmente en la balneología.



Figura 11.- Calefacción por geotermia<sup>21</sup>

#### Geotermia de media y alta entalpia

La energía geotérmica de media y alta entalpía aprovecha un recurso geotérmico que se encuentra generalmente a temperatura superior a los 150 °C. La mayoría de las veces se puede aprovechar el recurso para generación eléctrica de manera directa si existen

---

<sup>21</sup> <http://www.arqhys.com/articulos/calefaccion-geotermica.html>

condiciones favorables. En la figura 11 se muestra el esquema del aprovechamiento de baja entalpia para calefacción.

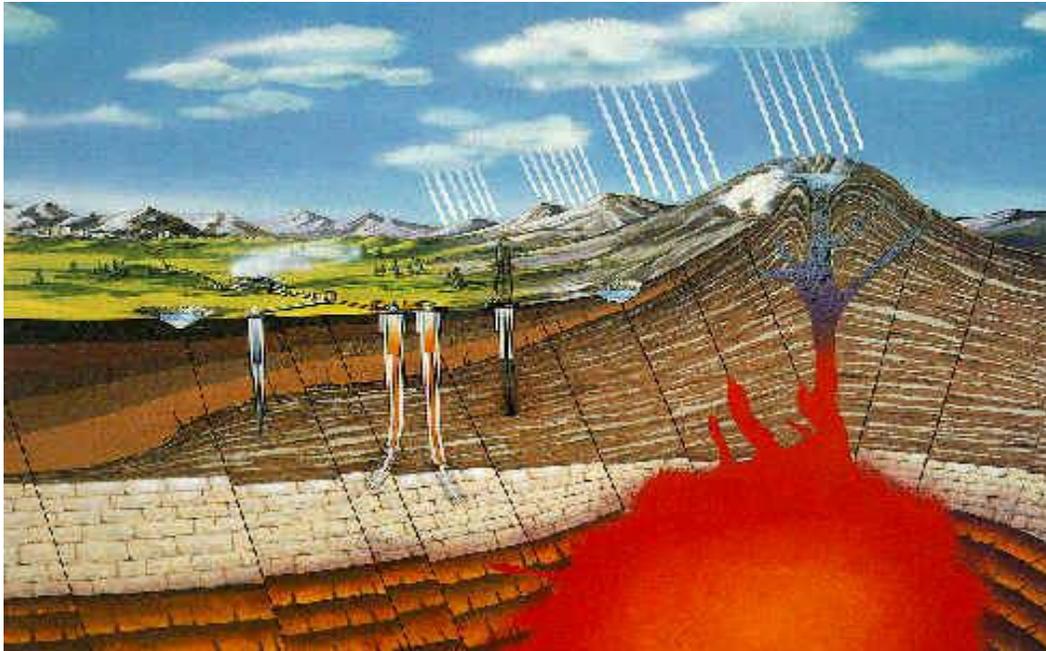


Figura 12.- Geotermia<sup>22</sup>

### 1.10 Tipos de tecnologías de generación geotérmica

Para transformar la energía geotérmica en energía eléctrica, es necesario elegir una tecnología para la generación y esta dependerá de las características del agua, vapor o mezcla, contenidas en el yacimiento y de la potencia eléctrica a generar.

Existen diversos tipos de ciclos de generación para el aprovechamiento de fuentes geotérmicas de alta y baja entalpía. Entre éstos se pueden destacar los siguientes:

- Ciclo a contrapresión
- Ciclo a condensación
- Sistemas de ciclo binario.

<sup>22</sup> <http://www.renovablesverdes.com/la-geotermia-el-calor-de-las-rocas/>

### 1.10.1 Ciclo a contrapresión

Es el más simple y económico de todos los ciclos geotérmicos. El vapor seco del pozo, o previa separación de agua si es vapor húmedo, se envía a la turbina y luego se descarga a la atmósfera, teniendo como consecuencia que la eficiencia de operación sea baja.

El consumo específico de vapor es mayor que una unidad a condensación, generalmente el doble, sin embargo el tiempo de instalación es menor en comparación con los otros sistemas de generación. Un aspecto importante es su utilidad cuando el porcentaje de gases incondensables es alto (mayor a 12% en peso).

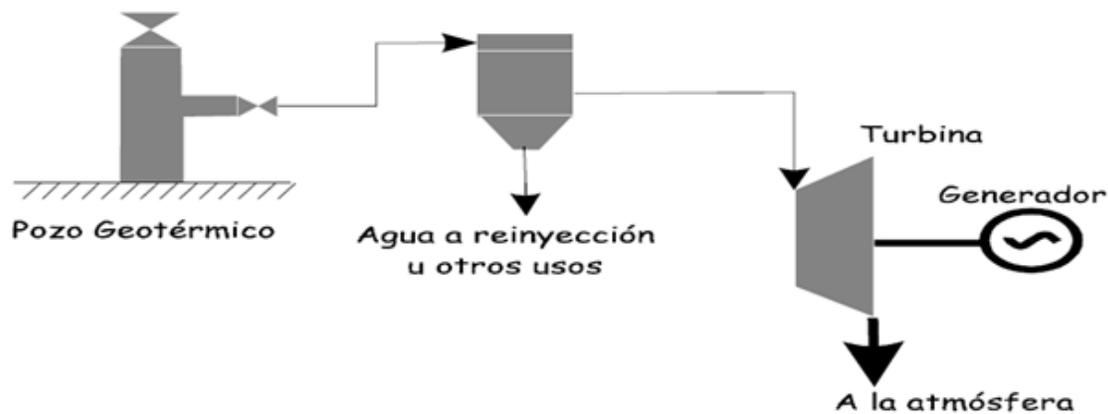


Figura 13.-Ciclo a contrapresión<sup>23</sup>

### 1.10.2 Ciclo a condensación

El rendimiento es más elevado que el ciclo a contrapresión, después de pasar el vapor por la turbina, pasa por un condensador que trabaja al vacío. La condensación se hace mediante un fluido frío, en este caso el fluido es el mismo que se obtiene en el condensador, para poder usar el fluido como refrigerante, tiene que pasar por un sistema de enfriamiento (torre de enfriamiento), donde una parte de este se pierde por evaporación

<sup>23</sup> j.l. sierra, g. Pedro, (1998), "Energía geotérmica"

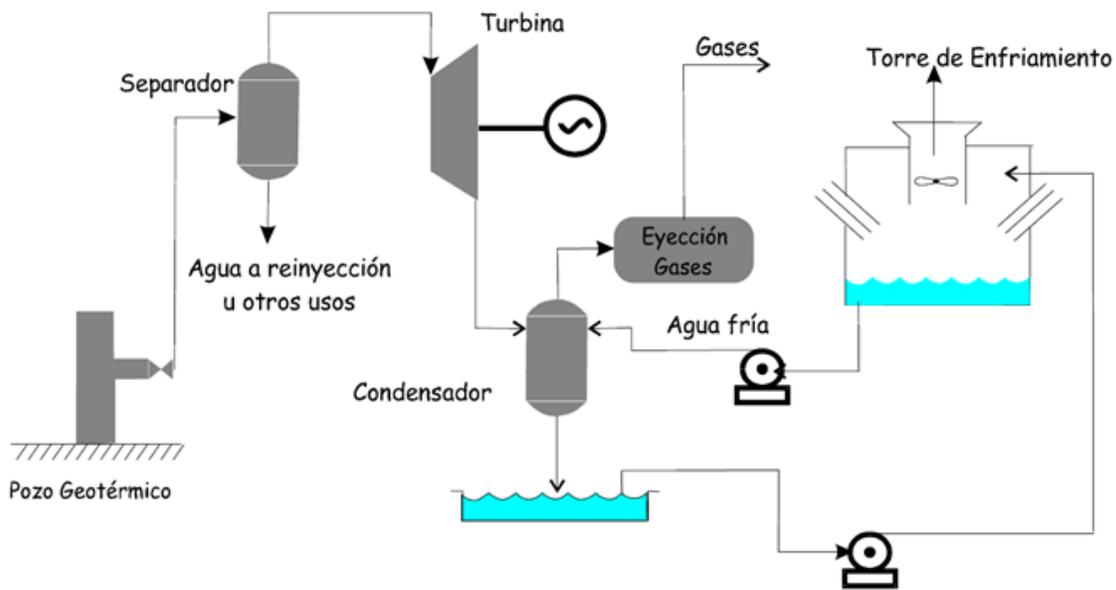


Figura 14.- Ciclo a condensación<sup>24</sup>

### 1.10.3 Sistemas de ciclo binario

Los sistemas de generación de electricidad mediante el ciclo binario son utilizados en los yacimientos donde predomina el agua líquida ó de baja temperatura. Para generar electricidad se utiliza un segundo fluido el cual tiene punto de ebullición más bajo que el del agua, tales como isopentano, isobutano, freón, etc. Este fluido es transportado mediante el uso de bombas que requieren de una cantidad importante de la energía generada. El costo de este tipo de generación es más elevado que el de contrapresión y condensación.

<sup>24</sup> j.l. sierra, g. Pedro, (1998), "Energía geotérmica"

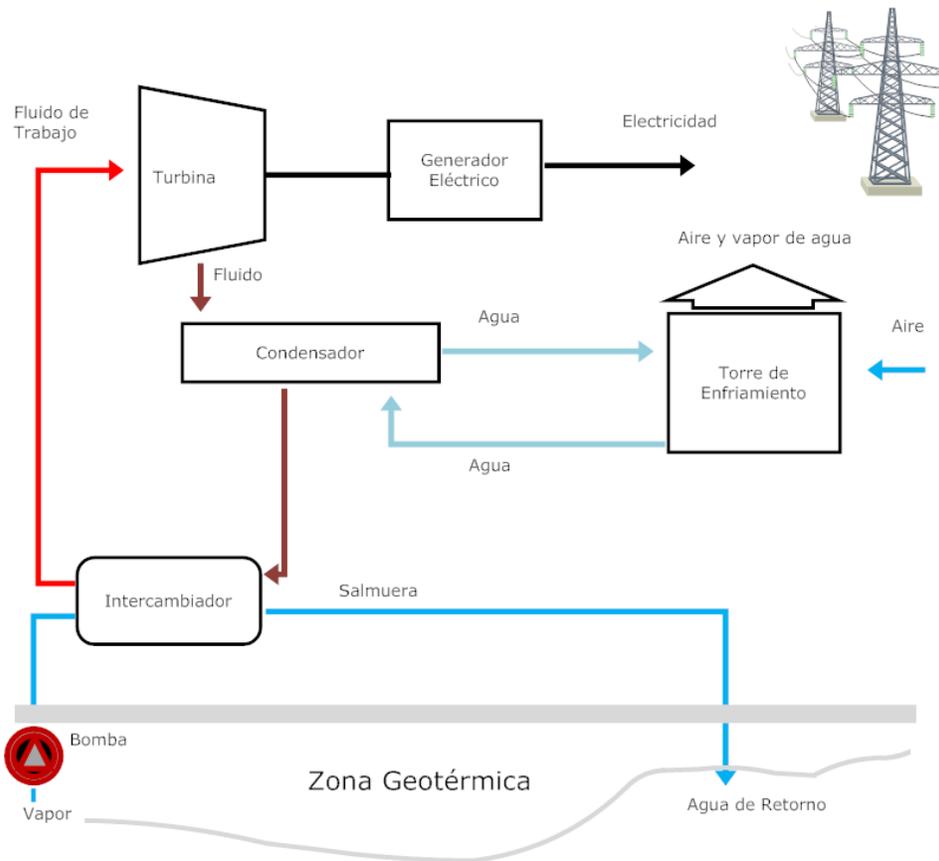


Figura 15.- Ciclo Binario

Al extraer el agua del yacimiento se conduce hasta un sistema intercambiador de calor donde el agua cede energía para evaporar un segundo fluido. El agua que cedió parte de su energía es reinyectado al yacimiento mediante uno o varios pozos de reinyección. Una vez que el fluido de trabajo se ha evaporado se conduce del intercambiador de calor hasta una turbina que se encuentra acoplada mecánicamente a un motor eléctrico el cual transforma la energía mecánica en energía eléctrica, posteriormente el fluido se lleva hasta un condensador para después poder regresarlo hasta el intercambiador. Este ciclo requiere un sistema de enfriamiento que utiliza agua externa para poder enfriar el condensador. Las plantas de ciclo binario son generalmente unidades de pequeño tamaño pero que al ser replicadas pueden constituir plantas eléctricas de decenas de megawatts<sup>25</sup>.

<sup>25</sup> Dickson, Mary H. y Fanelli Mario “Qué es la energía geotérmica” Istituto di Geoscienze

## **CAPÍTULO II**

# **ETAPAS Y COSTOS DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO**

## **CAPÍTULO II.- ETAPAS Y COSTOS DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO**

### **2.1 Introducción**

El primer desafío para poder explotar un campo geotérmico es localizar los yacimientos técnica y económicamente adecuados. Para la localización de uno o varios pozos, los cuales podrán ser utilizados para producción o reinyección y posteriormente la creación de una central Geotérmica, es necesario realizar una serie de estudios, geológicos, geofísicos y geoquímicos. Los cuales determinaran el lugar y la profundidad de la zona productora. Los estudios de exploración geotérmica se dividen en dos etapas. La primera comprende los estudios realizados antes de las perforaciones profundas, en la segunda se realizan perforaciones profundas para demostrar la existencia del recurso geotérmico.

Antes de la creación de un proyecto geotérmico es necesario un estudio de factibilidad para conocer el potencial y los riesgos que implican la instalación de un proyecto geotérmico.

La ejecución de un proyecto geotermoeléctrico se puede dividir en 3 etapas:

1. Exploración
2. Desarrollo
3. Explotación

### **2.2 Exploración**

El objetivo de la exploración es conocer las características del recurso geotérmico tales como: Ubicación de zonas productivas, definir el tamaño, el tipo de fluido, la temperatura, composición química para sucesivamente evaluar su capacidad geotérmica y a su vez para producir energía eléctrica. En esta etapa intervienen muchos especialistas que trabajan en paralelo.

El tener manifestaciones superficiales generalmente indican la existencia de un yacimiento sin embargo estas condiciones no son un requisito para encontrar un yacimiento geotérmico. La exploración comienza con la recopilación de información relacionada con la zona de estudio que se hayan realizado anteriormente, datos topográficos, hidrogeológicos. La exploración se puede dividir generalmente en tres técnicas empleadas: técnicas geológicas, técnicas geofísicas y técnicas geoquímicas.

La exploración, ya sea regional o de detalle, debe iniciar con una buena cartografía de la zona. Esta cartografía incluye información de la secuencia litológica y vulcanológica,

información estructural (fallas y fracturas, campo de esfuerzos), información topográfica, información hidrotermal (manifestaciones superficiales, áreas de alteración), Con base en la cartografía, se pueden elaborar modelos geológicos preliminares del subsuelo, que sirvan de guía en los subsecuentes estados de la exploración<sup>26</sup>

### 2.2.1 Técnicas Geológicas

Objetivo: Conocer las distintas unidades geológicas del terreno, determinar las estructuras o fallas geológicas además de establecer la columna estratigráfica que podrá tener el subsuelo. Mediante levantamientos geológicos, elaboración de mapas para obtener un modelo preliminar del sistema geotérmico. En la figura 16 se presenta un ejemplo de un mapa geológico elaborado con el propósito de identificar estructuras y litologías para la ciudad de Pátzcuaro.

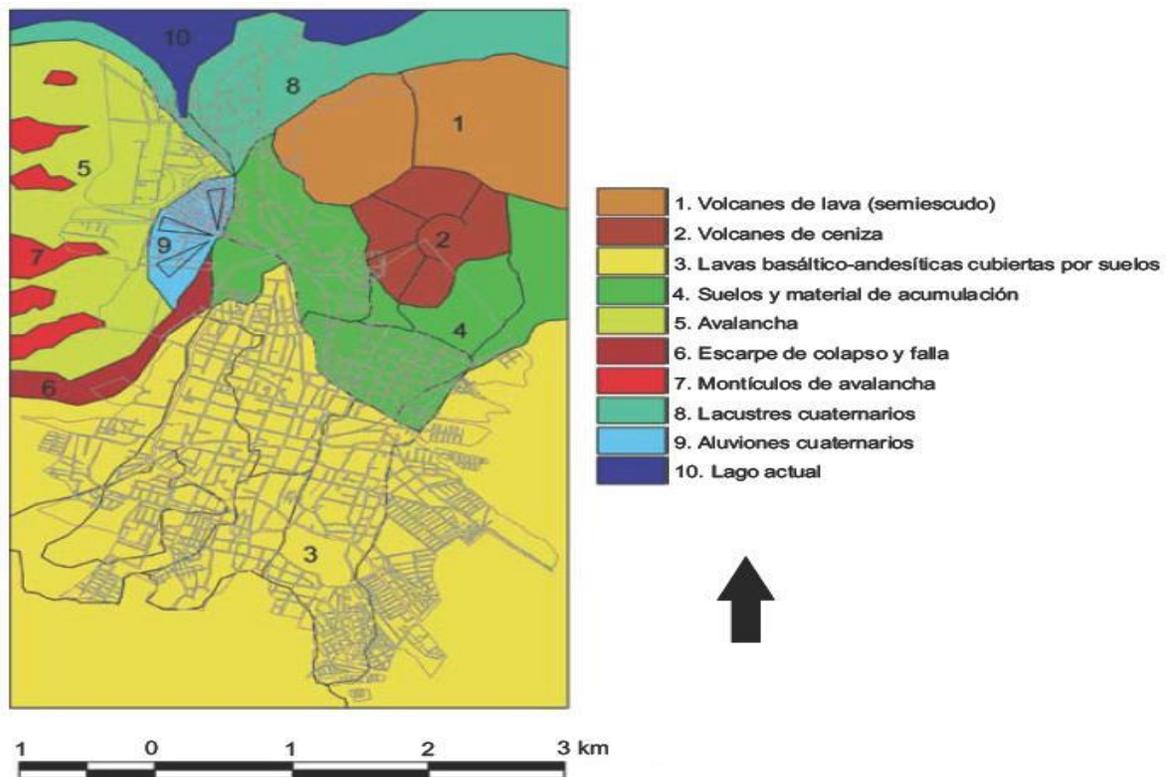


Figura 16.- Geología superficial de la ciudad de Pátzcuaro, Michoacán<sup>27</sup>

<sup>26</sup> Hiriart Le Bert, Gerardo. 2011 "Evaluación de la energía geotérmica en México" Reporte para el BID

<sup>27</sup> [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742009000300007&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742009000300007&script=sci_arttext)

## 2.2.2 Técnicas Geofísicas

Son técnicas superficiales indirectas que buscan conocer parámetros físicos de las rocas que constituyen el sistema geotérmico. Los Ingenieros Geofísicos buscan zonas de alta conductividad eléctrica en el subsuelo, lo que podría indicar agua caliente con sales disueltas, algunas técnicas son:

Eléctricas: determinan la conductividad eléctrica

Sísmica: determinan la velocidad propagación de ondas elásticas en la tierra

Gravimetría: detecta cambios de densidad generadas por diferentes litologías (densidad de la roca)

Magnetometría: determina susceptibilidad magnética de las rocas.

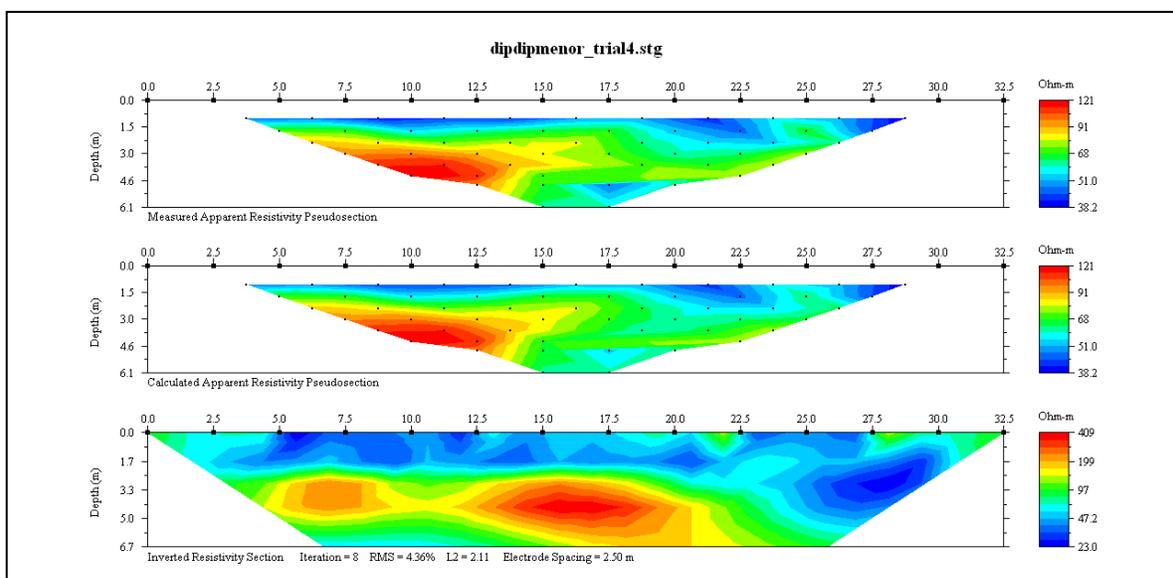


Figura 17.- Resultados Obtenidos de una tomografía eléctrica<sup>28</sup>

La Figura 17 nos muestra los resultados de un estudio realizado mediante las técnicas eléctricas, el cual presenta en colores los valores de resistividad de las rocas, siendo el color rojo la resistividad de mayor valor.

## 2.2.3 Técnicas Geoquímicas

Los estudios geoquímicos consisten en el muestreo y análisis químicos de agua y gas de las manifestaciones termales ó pozos del área de estudio, esto se hace para conocer la

<sup>28</sup> Cuellar y González (2010) “Reporte de prácticas profesionales de Geofísica” UNAM

composición química e isotópica, el origen del fluido geoquímico, las temperaturas probables del reservorio, las características corrosivas o incrustantes del fluido.



Figura 18.- Muestreo geoquímico

En la figura 17 se ilustra la toma de un muestreo geoquímico gases que se realizó en la etapa de evaluación de un Pozo. Mediante un miniseparador se extrae una muestra de gases incondensables, además de agua condensada que posteriormente se analiza en un laboratorio.

### Pozo Gradiente

El pozo de gradiente tiene como objetivo medir el gradiente térmico de la región, esto nos dará mayor información para tener una mejor ubicación de los pozos exploratorios que serán perforados. Generalmente estos pozos son de poca profundidad, de unos 200 metros con un diámetro muy pequeño, el cual se observa y distingue claramente en la figura 19.



Figura 19.- Pozo de gradiente<sup>29</sup>

<sup>29</sup> <http://www.energiandina.cl/2010/10/descripcion-de-la-geotermia-como-fuente-de-energia-2/>

## 2.2.4 Perforación Exploratoria de Diámetro reducido

Para obtener información que permita confirmar o modificar el modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico, se podrá tomar la decisión de perforar pozos exploratorios de diámetro reducido de propósito múltiple, que tienen la ventaja de determinar las condiciones reales del subsuelo a mayor profundidad que la de los pozos de gradiente.

## 2.3 Resultados de la Campaña exploratoria



Figura 20.- Integración de técnicas para el modelo geotérmico inicial<sup>30</sup>

Con los datos obtenidos de los estudios geológicos y geofísicos, se podrá elaborar un modelo preliminar del campo (área), con el cuales se tomara la decisión de realizar pozos exploratorios profundos, se podrá estimar el potencial energético del campo geotérmico con mayor detalle. Recordando que es un modelo preliminar el cual se estará actualizando con nuevos datos de los pozos exploratorios. En la figura 20 se aprecia algunos de los elementos de cada técnica para la caracterización del modelo de un campo geotérmico

## 2.4 Perforación exploratoria

Se tomará la decisión de situar y perforar un número reducido de pozos exploratorios (generalmente tres) con los cuales podremos comprobar las características del yacimiento para poder definir la capacidad de generación. El número tan reducido de pozos exploratorios se debe al alto costo en la perforación.

<sup>30</sup> <http://www.energiandina.cl/2010/10/descripcion-de-la-geotermia-como-fuente-de-energia-2/>



Figura 21.- Equipo de perforación

Una vez concluidos los pozos exploratorios se les deberán realizar diferentes pruebas, tales como pruebas de presión, temperatura, calibración, pruebas de interferencia, entre otras, las cuales darán información valiosa. En la figura 21 se aprecia un equipo de perforación de pozos.

## **2.5 Descripción básica de las instalaciones típicas de una central**

Se mostrara de manera muy simple los distintos equipos para una instalación típica en un central de generación. La operación de una central geotermoeléctrica comienza con la extracción de fluido caliente de un yacimiento en un pozo. El fluido se conduce a un separador, donde el vapor se transporta a la turbina que acoplada a un generador produce energía eléctrica. El agua separada es usualmente reinyectada.

### **2.5.1 Pozos**

La finalidad de los pozos es extraer el fluido geotérmico, se pueden clasificar como pozos productores e inyectores, sin embargo se puede dar el caso en que el pozo no funcione como productor ni como inyector. En este caso el pozo se puede usar para observar la presión dentro del yacimiento usando una cámara de suspensión, la cual monitorea la temperatura y la presión del yacimiento. En la figura 22 se muestra un diagrama del

estado mecánico de un pozo geotérmico, el cual puede alcanzar profundidades de hasta 3500 metros, con diferentes diámetros de tubería, los diámetros utilizados, en algunos y al menos en el campo geotérmico de los azufres se muestran en la Figura y son:

Agujero de 24"  $\Phi$  con Tubería de Revestimiento de 20"  $\Phi$

Agujero de 17.5"  $\Phi$  con Tubería de Revestimiento de 13 3/8"  $\Phi$

Agujero de 12.5"  $\Phi$  con Tubería de Revestimiento de 9 5/8"  $\Phi$

Agujero de 8" o 6" en agujero descubierto

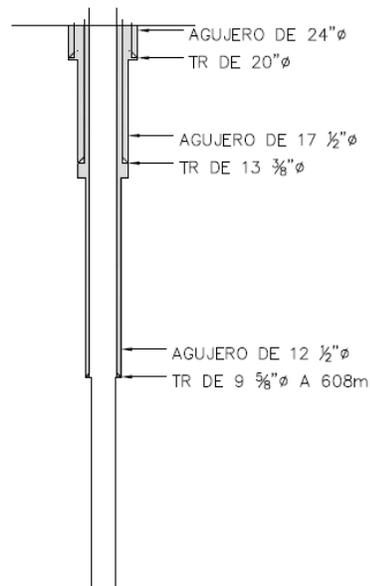


Figura 22. Diagrama de un pozo tipo geotérmico

## Pozos Productores

La finalidad de los pozos es extraer del reservorio geotérmico el fluido (mezcla de líquido vapor, Vapor, Gases, Sales) para poder generar electricidad.

## Pozos Inyectores

Se construyen generalmente de manera similar a los pozos productores. El objetivo de los pozos es inyectar el excedente para restaurar el reservorio cuando la extracción esta en progreso. Un pozo que se pensó para producción debido a su baja o nula productividad se puede convertir en un pozo de inyección. La figura 23 ilustra un pozo geotérmico.



Figura 23.- Pozo Mina Cerro Blanco

### 2.5.2 Tuberías para el transporte de fluidos

El transporte del fluido geotérmico se realiza mediante tuberías de acero diseñadas para trabajar a altas presiones y temperaturas. Estas transportan el fluido desde la cabeza del pozo hasta el sitio de aplicación. Se conoce como mezclaductos a las tuberías que conducen una mezcla de agua-vapor entre el pozo y los separadores. Y como vaporductos cuando transportan únicamente vapor. Es indispensable realizar un diseño correcto del sistema de transmisión de fluidos, así como del radio del ducto y la trayectoria que seguirá para evitar inestabilidades durante la operación que se verán reflejados en caídas de presión.



Figura 24.- Tuberías para el transporte de fluidos geotérmicos, Los azufres CFE (El autor)

### 2.5.3 Separador centrífugo

Como su nombre lo indica, estos tienen la función de separar la mezcla de fase líquida y vapor, para después transportar el vapor hacia la turbina y el líquido es reinyectado al yacimiento. Los separadores se diseñan dependiendo del tipo de producción que tenga el pozo, ya sea vapor o una mezcla de agua y vapor. En el caso en que se tiene una mezcla el silenciador también debe separar el líquido del vapor.



Figura 25.- Separador centrífugo

### 2.5.4 Secadores de humedad

Antes de ingresar el vapor a la turbina es necesario eliminar la mayor humedad posible en el vapor antes de ingresar a la turbina, para evitar corrosión en los álabes y aumentar la vida útil de la turbina.

### 2.5.5 Silenciadores

La función principal del silenciador es reducir el ruido generado por la descarga del fluido, al pasar de la presión del cabezal a la presión atmosférica. Puede ser portátil y permanente. Para el caso de la figura 26, el silenciador es portátil. Los silenciadores

portátiles, se usan cuando el pozo está en etapa de prueba o cuando se necesita hacer reparaciones a un pozo que ya este en etapa de producción.



Figura 26.- Silenciador portátil

### 2.5.6 Turbina

El vapor transportado se lleva a la turbina donde se expande hasta la presión de operación de la turbina. La turbina lleva acoplado generador eléctrico donde se transforma la energía mecánica en energía eléctrica.



Figura 27.- Turbina (El autor)

### 2.5.7 Condensador

Una vez que el vapor se expande en la turbina se transporta al condensador donde por contacto directo con el agua se condensa, el agua condensada se lleva a una torre de enfriamiento donde se le baja aun más la temperatura para volverse a utilizar en el condensador

### 2.5.8 Torre de enfriamiento

Su finalidad es disipar el calor mediante transferencia de energía entre el aire de la atmosfera y el agua que es trasportada del condensador. Existen diferentes arreglos sin embargo, siempre habrá parte del líquido que se evapore y la otra parte será almacenada para volver a utilizarse. El sobrante de agua podrá ser reinyectada o podrá ser tratada y comercializada.



Figura 28.- Torre de enfriamiento (El autor)

### 2.5.9 Elementos de seguridad

A fin de evitar daños en los recipientes y tuberías se instalan elementos de seguridad que evitan que la presión alcance o rebase la presión máxima de operación a la cual fueron diseñados los ductos y equipos, estos elemento son de apertura y cierre automáticos, como las válvulas de seguridad de presión. Otro elemento de seguridad es el disco de ruptura que una vez activado es necesaria la intervención del personal para poder reestablecer el sistema.

## CAPÍTULO III

# EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO EN LA ZONA DE SAN MARCOS JALISCO

## **CAPÍTULO III.- EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO EN LA ZONA DE SAN MARCOS JALISCO**

### **3.1 Introducción**

La evaluación del potencial de un yacimiento geotérmico depende de diversos factores como lo es el volumen del yacimiento, la temperatura en él, la porosidad de la roca, la presión del yacimiento entre otros. Existen métodos para evaluar el potencial con pocos datos pero que realizan simplificaciones para poder estimar. Para obtener una mejor aproximación se necesitara de estudios de geología, geofísica, geoquímica a detalle.

Se realizó la evaluación mediante uno de los métodos conocidos en la geotermia, el método volumétrico United States Geological Survey (USGS). Este método nos da una estimación del orden de magnitud del potencial a instalar. Todos los métodos utilizados para estimar el potencial de un campo nuevo, son simplificados pero permiten concluir adecuadamente acerca del potencial con poca información disponible.

### **3.2 San Marcos Evangelista**

Se localiza en la porción central del estado de Jalisco, México, a 65 kms al suroeste de la ciudad de Guadalajara, 12 kms al oeste del lago de Chapala, al noreste de la población de Zacoalco de Torres.

Los habitantes del pueblo se dedican a la agricultura, ganadería y al comercio, principalmente, se cultiva sorgo, maíz, frijol, garbanzo y tomate. Se cría ganado bovino, porcino y caprino; además de aves y colmenas. Existen pequeñas tiendas, dedicadas a la venta de productos de primera necesidad y comercios mixtos que venden artículos diversos.

Al igual que todos los pueblos de la región, San Marcos no posee fuentes de empleo estables, lo que origina que los habitantes emigren a otros lugares, principalmente a Estado Unidos<sup>31</sup>

Geológicamente el área de san marcos, Jalisco se encuentra en la porción media oriental de la faja volcánica Transmexicana (Eje neovolcánico), en el cruce de tres importantes estructuras regionales: Los Grabens de Tepic-Chapala, Chapala y de Colima.

---

<sup>31</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/San\\_Marcos\\_Evangelista\\_\(Jalisco\)](http://es.wikipedia.org/wiki/San_Marcos_Evangelista_(Jalisco))



Figura 29. Ubicación geográfica de San Marcos, Jalisco ( El Autor)

Como se muestra en la figura 29, San Marcos presenta gran cantidad de manifestaciones termales que podrían indicar la presencia de una fuente de calor. Se necesitará de mayor estudio en la zona para poder ubicar la perforación de pozos exploratorios y poder comprobar el potencial.

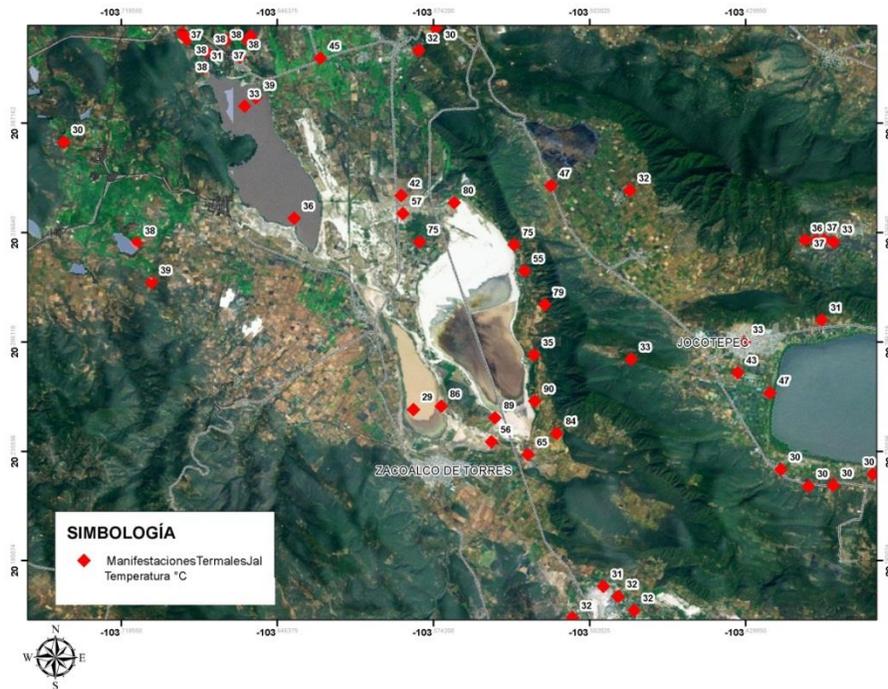


Figura 30. Localización de manifestaciones termales. (EL Autor)

### 3.3 Evaluación del potencial

Para un campo totalmente nuevo es necesario realizar una estimación preliminar del potencial, el número de pozos a perforar, el costo que tendrá la inversión inicial y el costo nivelado de generación. En la campaña de exploración se obtendrá información como: la temperatura del yacimiento, la porosidad de la roca, el espesor y área del yacimiento, entre otros datos con lo que se podrá realizar una estimación preliminar del potencial. Debido a que es difícil saber lo que se puede encontrar dentro de la tierra, algunos valores como el espesor, área del yacimiento y la porosidad de la roca, se presentan con incertidumbre. Durante el proceso de perforación se pueden extraer núcleos que son muestras representativas de la formación de la cuales podemos obtener datos reales de porosidad y permeabilidad de la roca, además de saturaciones del fluido.

Para determinar de forma indirecta la temperatura de un yacimiento se usa la relación Na/K (sodio/potasio), a partir de datos de aguas superficiales. La relación Na/K, en un agua termal indica la mecánica química del comportamiento y actividad de los iones Na y K en el sistema Roca-Agua. Para esto se utilizan geotermómetros Na/K los cuales estiman la temperatura, que en el caso de San Marcos, en base a geotermómetro se estima una temperatura mínima de yacimiento de 190 °C. Los parámetros mencionados para conocer éste potencial como la, humedad relativa, porosidad y densidad de la roca, etc. Fueron recopilados de diversos informes y algunos son estimados con base en la experiencia.

### 3.4 Algunos Métodos para la estimación de potencial

**Calor Remanente:** Estima el potencial del yacimiento calculando la energía contenida en el fluido y la roca del yacimiento, propone un factor de transferencia de calor, un factor de eficiencia de transformación y evalúa la potencia que debe ser instalada para disminuir la temperatura del yacimiento hasta un valor mínimo propuesto

**Análisis volumétrico:** Calcula la energía asociada intrínsecamente al contenido en masa en un yacimiento, considera que el yacimiento entregará toda la materia que tiene contenida y esta se usará con un porcentaje de evaporación en el separador y un factor de transformación típico

#### **Método volumétrico (Modelo USGS)<sup>32</sup>**

Durante el desarrollo de un proyecto geotérmico es común que se utilicen modelos para estimar el potencial de un yacimiento. Un modelo que se puede emplear en estos casos y

---

<sup>32</sup> Hiriart Le Bert, Gerardo. 2011 “Evaluación de la energía geotérmica en México” Reporte para el BID

de forma sencilla es el modelo volumétrico o método “USGS Heat in Place”. Para conocer un poco más sobre este método enseguida se presenta una descripción del mismo.

La cantidad de calor recuperable es uno de los parámetros que se determina al conocer el calor disponible en el yacimiento. Sin embargo se considera que el recurso geotérmico (totalmente en fase líquida) es llevado a superficie con una efectividad de recuperación  $R_g$  y luego es enfriado hasta temperatura ambiente (recuperación ideal).

$$q_{recuperable} = R_g q$$

$$q_{recuperable} = R_g V \cdot [\phi \rho_{agua} C_{p_{agua}} + (1 - \phi) \rho_{roca} C_{roca}] \cdot (T_{yacimiento} - T_{ambiente})$$

Donde  $q$  es el calor disponible,  $V$  el volumen total del yacimiento,  $\phi$  la porosidad,  $\rho$  la densidad,  $C_p$  el calor específico a presión constante,  $C$  la capacidad calorífica y  $T$  la temperatura.

Por otra parte, una vez que se conoce el calor recuperable se calcula la cantidad de fluido que debería ser extraída del yacimiento para recuperar este calor. Esto se determina al realizar el cociente del calor recuperable por la diferencia de entalpía que tiene el agua en el yacimiento y la del agua si ésta fuera enfriada a temperatura ambiente.

$$M_{Recuperable} = \frac{q_{Recuperable}}{h_{yacimiento} - h_{ambiente}}$$

Para conocer la cantidad de masa aprovechable (condiciones reales) a partir de la masa recuperable (condiciones ideales) es necesario evaluar la fracción de vapor generada en superficie al llevar el fluido a presión de separación.

$$M_{Aprovechable} = X_{separador} \cdot M_{Recuperable}$$

Sin embargo debe conocerse primero la calidad en el separador, la cual se define como la fracción de fluido recuperado que realmente puede ser utilizado en la generación. Éste será entonces función de la presión de separación (si se supone flujo isoentálpico):

$$X_{separador} = \frac{h_{yacimiento} - h_{f@sep}}{h_{fg@sep}}$$

Una vez conocida la cantidad de masa aprovechable se procede a determinar el potencial geotérmico en potencia eléctrica, realizando el cociente de este valor por el tiempo de explotación y el consumo específico calculado de la central:

$$W_{electrica} = \frac{M_{Aprovechable}}{CE_{central} \cdot t}$$

Por su parte, el consumo específico de la central se encuentra relacionado con el inverso de la eficiencia del ciclo, es decir, una central eficiente tendrá menor consumo específico que una central ineficiente:

$$CE_{central} = \frac{1}{\eta_{ciclo}(h_{g@sep} - h_{ambiente})}$$

De los parámetros anteriormente descritos podemos decir que al realizar una evaluación del potencial de forma sencilla, debe conocerse lo siguiente:

1. Temperatura de yacimiento:
2. Área de yacimiento:
3. Espesor de yacimiento
4. Factor de recuperación (Rg)
5. Porosidad de roca
6. Densidad de roca
7. Capacidad calorífica de roca
8. Presión de separación
9. Vida del proyecto
10. Temperatura ambiente
11. Temperatura de bulbo húmedo/humedad relativa

Al considerar que se está trabajando con un fenómeno que ocurre a grandes profundidades, no es posible conocer con certeza algunos de los parámetros mencionados anteriormente, lo que sí puede realizarse es una estimación de los mismos. Por otra parte hay parámetros que sí pueden conocerse con precisión.

### **3.5 Definición de los escenarios para la evaluación del potencial**

#### **Estimación de potencial**

La valoración de reservorio y la predicción de la capacidad eléctrica, debe ser considerada como un proceso continuo de la fase de exploración temprana. Para evaluar el potencial se proponen un rango de valores que pueden tomar los parámetros del yacimiento, donde se propondrán parámetros pesimistas, esperados y optimistas. Se deberá tomar valores medios ya que las posibilidades de ocurrencia para un caso demasiado optimista y otro poco optimista serán demasiado bajas, pero no imposibles. Estos datos se definieron de acuerdo a la experiencia con otros campos geotérmicos. Para realizar la evaluación del

potencial geotérmico se utilizó un programa desarrollado en Excel, el cual se elaboró basándose en la teoría del método volumétrico USGS, para posteriormente estimar el potencial geotérmico en México, el cual fue presentado por Hiriart, 2011 (Evaluación de la energía geotérmica en México Reporte para el BID). En la sección de anexos se presentan algunas imágenes de dicho programa.

Parámetro	Unidades	Escenario Pesimista	Escenario Esperado	Escenario Optimista
Vida del Proyecto	Años	20	25	30
Presión de separación	Bar	9	10	11
Área	km <sup>2</sup>	2	3	4
Espesor	Km	0.4	0.5	0.6
Temperatura yacimiento	°C	220	250	280
Temperatura ambiente	°C	11	21	30
Humedad Relativa	%	29%	53%	78%
Porosidad	%	5%	12%	15%
Densidad de roca	kg/m <sup>3</sup>	2600	2700	2800
Cr	kJ/kg K	0.79	0.95	1.1
Rg	%	5%	13%	20%

Tabla 9.- Parámetros y Escenarios para la estimación del potencial geotérmico.

Con los pozos exploratorios y productores perforados, se necesitará entrar en una fase de evaluación en la cual se realizaran una serie de pruebas con las cuales se tendrá mejor y mayor información del yacimiento, entonces se podrá dar una mejor estimación del potencial geotérmico a instalar.

### Etapas de pruebas

Al perforar se corren registros para conocer mediante una sonda, la permeabilidad de la roca, las cavernas que se forman, la cantidad de cementación efectuada. También se realiza el corte de núcleos para su posterior análisis.

**Desarrollo de pozos.** Al terminar el pozo se corren registros de presión, temperatura y flujo (Registro PTS), con el pozo estático y fluyendo. En el registro PTS estático, se obtienen zonas de aporte y la presión inicial del yacimiento. El registro PTS dinámico permite conocer la presión y temperatura de saturación del fluido producido. Estos datos son de gran importancia durante el desarrollo del pozo.

**Curvas de producción.** Tienen el objetivo de conocer el diámetro óptimo de descarga, así como la presión adecuada (presión de separación) para transportar el fluido a la turbina de generación

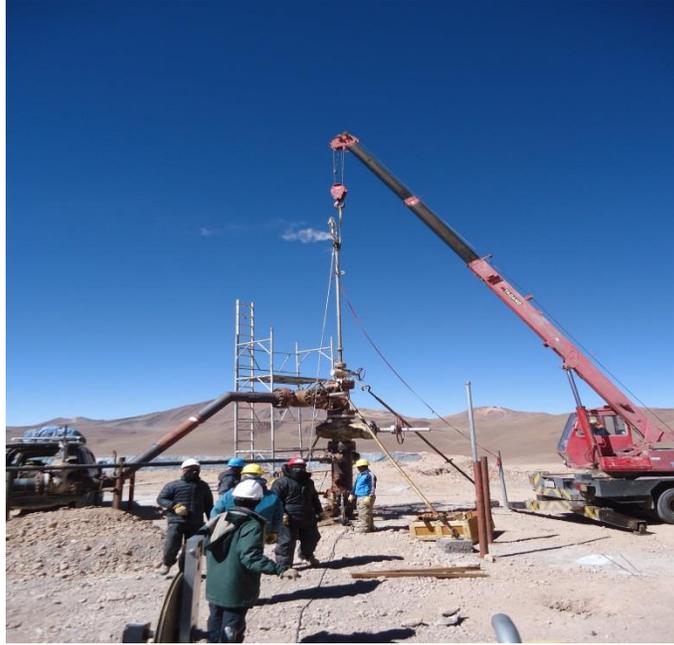


Figura 31. Prueba PTS

En la figura 31 se observa una prueba PTS realizada en un pozo geotérmico, en la cual se introduce una sonda que registra los parámetros de presión, temperatura y spiner. Para la evaluación de producción de un campo.

### 3.6 Tabla de resultados

Evaluando los datos mediante el método volumétrico USGS obtenemos:

Escenario		Potencia Instalable [MW]
San Marcos	Optimista	47
	Esperado	14
	Pesimista	2
Promedio		21

Tabla 10.- Resultados

La tabla anterior nos muestra las posibles potencias de instalación para la zona, con datos bajos y optimistas. Se necesitara de diversos estudios a detalle para conocer una mejor estimación. Sin embargo San Marcos presenta potencial geotérmico para la creación de

una planta de generación geotérmica, el cual se encuentra entre 2 MW y 47 MW probables.

El potencial geotérmico depende de diversas variables, debido a que se desconoce el valor exacto para cada una de ellas, no es posible determinar un resultado único. Al realizar este tipo de evaluaciones es importante estimar las incertidumbres, para ello se utilizan técnicas estadísticas, las cuales pueden determinar los intervalos de confianza<sup>33</sup>.

---

<sup>33</sup> Iglesias et al, (2005), "**Estimación del recurso y Prospectiva tecnológica de la Geotermia en México**"  
Instituto de Investigaciones Eléctricas

# CAPÍTULO IV EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO GEOTÉRMICO

## **CAPÍTULO IV.- EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO GEOTÉRMICO**

### **4.1 Introducción**

Para conocer la viabilidad económica de un proyecto se deberá realizar un análisis económico, el cual dará indicadores para la toma de decisiones dentro del proyecto. Para este caso se evaluará mediante la metodología del costo nivelado de generación, el cual se expresa en unidades monetarias, usualmente en centavos de dólar americano por kilowatt-hora generado, partiendo de las inversiones iniciales y flujos de efectivo que se estima pueda generar el proyecto durante su vida útil, los resultados no siempre son significativos de la rentabilidad del proyecto, pero dan idea de las inversiones necesarias para comenzar el proyecto. El costo del vapor geotérmico considera un cargo inicial que comprende las instalaciones superficiales en el campo, la exploración y perforación de pozos productores e inyectores necesarios para iniciar la operación comercial. Además, durante la vida de la central, son originados costos debido a los reemplazos de pozos e instalaciones superficiales, reparación y limpieza de pozos, así como a la operación y mantenimiento del campo geotérmico.

### **4.2 Costo nivelado de generación**

Existen diferentes tecnologías para generar electricidad, por ejemplo: Geotermia, Energía Eólica, Energía Solar, entre otras y cada una cuenta con características especiales como lo es el tiempo de vida, el costo de la inversión, etc. Para poder realizar una comparación entre los tipos de generación se deben tomar en cuenta las características especiales, ya que cada una tiene grandes diferencias y por esta razón sería muy complicado realizar una comparación.

Existe una metodología llamada Costo Nivelado de Generación (CNG) que es un indicador comparativo entre tecnologías de generación el cual permite cuantificar el costo unitario de la electricidad generada en kWh.

La metodología toma en cuenta los diferentes costos que se realizaron para la generación de electricidad. Estos son la suma de los Costos de inversión, Costos de operación, Costos de mantenimiento, Costos de Producción.

Costo de la inversión<sup>34</sup>. Puede dividirse en cuatro componentes: i) exploración; ii) perforación de los pozos productores e inyectores; iii) construcción de instalaciones superficiales e infraestructura; iv) construcción de la planta.

Costos de operación y mantenimiento. Consisten en costos fijos y variables relacionados directamente con la generación de electricidad.

Tecnología	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Turbo Gas y Ciclo Combinado	0.73	1.02	1.07	1.16	1.07	1.06	1.38	0.87	0.9
Diesel	2.43	3.02	3.61	6.91	6.07	4.81	7.85	8.12	15.91
Vapor( Combustoleo)	0.45	0.62	0.6	0.78	1.02	1.06	1.58	1.5	1.79
Carboeléctrica y Dual (Carbón y combustoleo)	0.47	0.57	0.7	0.65	0.65	0.67	1.1	0.97	0.9
Geotermoeléctrica	0.36	0.38	0.44	0.41	0.46	0.36	0.59	0.48	0.47
Eoloeléctrica	1.16	1.52	1.34	1.87	0.27	0.61	0.74	0.69	1.02
Nuclear	0.74	0.75	0.95	0.77	0.83	0.91	1.12	1.04	1.97
Generación Hidroeléctrica	0.47	0.64	0.52	0.49	0.49	0.55	0.49	0.63	0.44

El Costo de Generación Incluye:

- Remuneraciones y prestaciones al personal
- Energéticos y fuerza comprada
- Mantenimiento y Servicios Generales por Contrato
- Materiales de Mantenimiento y consumo
- Impuestos y Derechos
- Otros Gastos
- Costo de obligaciones laborales
- Depreciación
- Indirectos del Corporativo
- Aprovechamiento y Costo financiero

Tabla 11.- Costo de generación por tecnología<sup>35</sup>

En la tabla 11 notamos que el costo unitario de kWh para la energía geotérmica es uno de los más bajos además de que durante el paso de los años el costo se ha mantenido en un rango estable, no así el costo de kWh para la tecnología por Diesel que ha venido incrementando y lo seguirá haciendo. Este indicador es de gran importancia ya que con esto podemos ver la viabilidad en la generación por energía geotérmica.

<sup>34</sup> Hiriart Le Bert, Gerardo (2011) "Tecnologías de punta y costos asociados para generación distribuida, autoabastecimiento y cogeneración con recursos geotérmicos en México" ESMAP

<sup>35</sup> Comisión Federal de Electricidad

### 4.3 Metodología del Costo nivelado de generación

Para estimar el costo nivelado de generación se requiere conocer de aspectos técnicos y económicos como son: los costos de inversión, factor de planta, vida útil de la planta, tasa de descuento entre otras.

Factor de planta

Fracción de energía generada en comparación a la energía máxima teóricamente disponible (100%) durante un periodo de tiempo, generalmente de un año

Tasa de descuento

Tasa de interés que refleja en valor del dinero en el tiempo y que se utiliza para convertir costos y beneficios que ocurren en tiempos diferentes a valores equivalentes asociados a un tiempo común.

Metodología

Se calcula dividiendo el valor presente de los egresos que ocasionan la construcción de una central generadora, más los costos de operación y mantenimiento durante la vida útil, entre el valor presente de la energía que generará durante ese periodo. Otra forma de hacerlo, dividiendo la inversión entre el factor de valor presente para los años de vida de la central, multiplicado por la generación anual de la planta.

El cálculo de los costos nivelados se realiza multiplicando éste por el índice de precios correspondientes al año al cual hay que actualizar. Los índices de precios son factores que tratan de representar de modo fiel la evolución de un bien o servicio, los cambios que ha sufrido (precios históricos) o los cambios que sufrirá (proyecciones o pronósticos).

$$C_0 = C_1 \left( \frac{IP_0}{IP} \right)$$

Donde:

$IP_0$  = Índice del año al que se actualiza la moneda.

$IP$  = Índice del año al que corresponde la moneda.

$C_1$  = Costo en el año al que corresponde la moneda.

$C_0$  = Costo actualizado.

Costo del kW generado se calcula:

$$C = \frac{CI}{(KW)(Fu)(t)(F.V.P)}$$

Donde:

C= Costo del kW generado (\$/kWh)

kW=Capacidad nominal de la planta (kW)

Fu=Factor de utilización.- en este caso se toma de 80%

t=Tiempo de máximo de operación anual (horas)

CI=Inversión realizada en valor presente (Inversión año de referencia X FVP)

El factor del valor presente (FVP) se determina mediante:

$$FVP = M(1 + i)^n$$

M=Inversión realizada a precios constantes del año (tal)

i=Tasa de interés anual.

n=Año de referencia |

#### **4.4 Costos Estimados para el proyecto geotermoeléctrico**

Para la realización del proyecto se propone, se realice en 1 año: la exploración, los permisos y concesiones, la infraestructura de caminos, la perforación exploratoria de 2 pozos y las líneas de transmisión. Además se realicen 2 pozos exploratorios en el lapso de 1 año.

Al inicio del proyecto se estiman los costos de inversión para el proyecto con gran incertidumbre, y solo en proceso de operación y creación, para algunos casos, se conocerá en valor real de los conceptos. Será necesario repetir el análisis en cuanto se tenga mayor información para estimar con mayor precisión en Costo Nivelado de Generación.

El caso de la exploración representa una inversión relativamente poco costosa la cual aportará información valiosa para poder estimar el potencia instalable de nuestro proyecto.

Al igual que la exploración, la perforación de pozos exploratorios dará mayor información, con la cual se podrá realizar un modelo matemático del yacimiento y así poder proponer la ubicación de los pozos productores.

Con la perforación de los pozos productores se definirá con mayor precisión el cálculo del potencial geotérmico del campo, duración del yacimiento, mantenimiento del campo, entre otros.

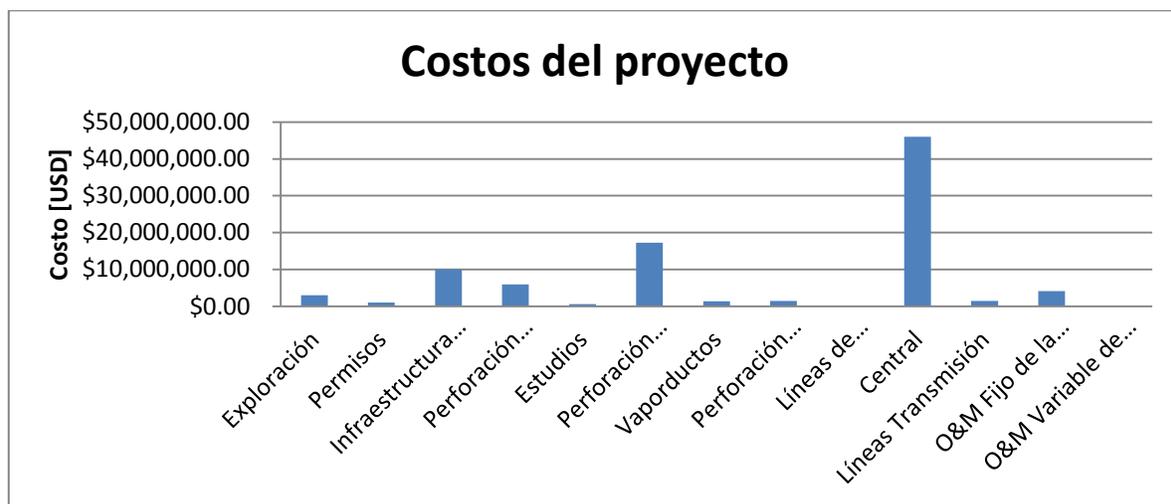


Figura 32. Costos del proyecto

En la Gráfica se muestran los costos del proyecto, observamos que la mayor inversión en capital se encuentra en la construcción de la central, infraestructura de caminos, la perforación de los pozos exploratorios y productores. También notamos que se necesita de una gran inversión inicial para poder obtener un mejor modelo del yacimiento y por consecuencia una mejor estimación del potencial geotérmico a instalar, ya que será necesario perforar pozos para obtener datos. Los costos presentados en la tabla 11, se obtuvieron con ayuda de un programa llamado GEOCOST<sup>36</sup>

	Precio [US\$]
<b>Exploración</b>	\$3,000,000.00
<b>Permisos</b>	\$1,000,000.00
<b>Infraestructura caminos</b>	\$10,000,000.00

<sup>36</sup> Espíndola S., (2006), **Viabilidad Económica de Proyectos Geotermoeléctricos, un Enfoque Integral**, Tesis de licenciatura, Facultad Ingeniería UNAM, México

<b>Perforación Exploratoria</b>	\$6,000,000.00
<b>Estudios</b>	\$640,000.00
<b>Perforación Producción</b>	\$17,260,425.00
<b>Vapor ductos</b>	\$1,409,848.20
<b>Perforación reinyección</b>	\$1,500,000.00
<b>Líneas de reinyección</b>	\$49,000.00
<b>Central</b>	\$46,000,000.00
<b>Líneas Transmisión</b>	\$1,500,000.00
<b>O&amp;M Fijo de la Central</b>	\$4,139,100.00
<b>O&amp;M Variable de la central</b>	\$176,541.52
<b>TOTAL</b>	\$92,674,914.72

Tabla 12.- Costos aproximados para el proyecto<sup>37</sup>

#### 4.5 Cálculo del Costo nivelado

Para obtener el costo nivelado será necesario suponer algunos datos, en función de otros datos reportados de los campos geotérmicos en México.

Datos supuestos

Costo de Operación y Mantenimiento	2.5 [¢\$/kWh]
Factor de Planta	90%
Tasa de descuento	12%

Tabla 13.- Datos supuestos para el costo nivelado de generación

Los desarrollos en Los Azufres y Cerro Prieto tienen como costo de inversión reportado 2,010 y 2,130 USD/kW, así como costos de generación de 8.84 y 9.24 ¢ USD/kWh respectivamente<sup>38</sup>.

El costo de Kw instalado de una planta de generación por geotermia es de (2,000  $U\$/KW$ ),

La inversión en Central para producir 21 MW es igual a:

<sup>37</sup> Espíndola S., (2006), **Viabilidad Económica de Proyectos Geotermoeléctricos, un Enfoque Integral**, Tesis de licenciatura, Facultad Ingeniería UNAM, México.

<sup>38</sup> [www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/MemoriasdeEventos/Documents/SemanaVerde2011/02%20MARTES%20Energia/Energia/EnergiaenMexicoyMundo.pdf](http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/MemoriasdeEventos/Documents/SemanaVerde2011/02%20MARTES%20Energia/Energia/EnergiaenMexicoyMundo.pdf)

$$(2000 \text{ U\$}/\text{KW}) \times (21000 \text{ kw}) = 42,000,000 \text{ U\$}$$

Con 21 MW se producirá al año:

$$(21000 \text{ kw}) \times (8760 \text{ h}) \times (0.9) = 165,564,000 \text{ [kWh]}$$

Para obtener el costo nivelado de la central con un tiempo de vida de 25 años y con una tasa de descuento del 12%, en tablas tenemos que el Factor del Valor Presente será de 7.843

Obteniendo el Costo Nivelado que llamaremos  $C [\text{U\$}/\text{KWh}]$ :

$$42,000,000 \text{ U\$} = (7.843 \text{ FVP}) \times (165,564,000 \text{ [kWh]}) \times (C [\text{U\$}/\text{KWh}])$$

$$C [\text{U\$}/\text{KWh}] = 42,000,000 \text{ U\$} / (7.843 \text{ FVP}) \times (165,564,000 \text{ [kWh]})$$

$$C [\text{U\$}/\text{KWh}] = 0.0323 [\text{U\$}/\text{KWh}] = 3.23 [\text{¢U\$}/\text{KWh}]$$

Suponiendo el costo de operación y mantenimiento es de  $2.5 \text{ ¢U\$}/\text{KWh}$

Es costo de Operación y Mantenimiento al año será de:

$$0.025 [\text{U\$}/\text{KWh}] \times 7,884,000 \text{ [kWh/año]} = 197,100 \text{ [U\$}/\text{año}]$$

Obteniendo el Costo nivelado para Para exploración:

$$3,000,000 \text{ U\$} = (7.843 \text{ FVP}) \times (165,564,000 \text{ [kWh]}) \times (C [\text{U\$}/\text{KWh}])$$

$$C [U\$/KWh] = 3,000,000 U\$ / (7.8431FVP) \times (165,564,000 [kWh])$$

$$C [U\$/KWh] = 0.0023 [U\$/KWh] = 0.23 [¢U\$/KWh]$$

Aplicando la misma metodología para obtener el costo nivelado de Permisos, Caminos, perforación exploratoria, Estudios, Perforación para producción, Vaporductos, Perforación para reinyección y Líneas de reinyección. Obtenemos la tabla 14:

	Precio [US\$]	CN [U\$/kWh]	CN [¢\$/kWh]
<b>Exploración</b>	\$3,000,000.00	0.00231	0.231029582
<b>Permisos</b>	\$1,000,000.00	0.00077	0.077009861
<b>Infraestructura caminos</b>	\$10,000,000.00	0.00770	0.770098606
<b>Perforación Exploratoria</b>	\$6,000,000.00	0.00462	0.462059164
<b>Estudios</b>	\$640,000.00	0.00049	0.049286311
<b>Perforación Producción</b>	\$17,260,425.00	0.01329	1.329222923
<b>Vaporducto</b>	\$1,409,848.20	0.00109	0.108572213
<b>Perforación reinyección</b>	\$1,500,000.00	0.00116	0.115514791
<b>Líneas de reinyección</b>	\$49,000.00	0.00004	0.003773483
<b>Central</b>	\$46,000,000.00	0.03542	3.542453588
<b>Líneas Transmisión</b>	\$1,500,000.00	0.00116	0.115514791
<b>O&amp;M Fijo de la Central</b>	\$4,139,100.00	0.00319	0.318751514
<b>O&amp;M Variable de la central</b>	\$176,541.52	0.00014	0.013595438
<b>TOTAL</b>	\$92,674,914.72	<b>0.07137</b>	<b>7.136882265</b>

Tabla 14.- Resultados de los costos nivelados de generación

En la tabla 14 se muestran los costos nivelados para las inversiones que se realizarán durante las etapas del proyecto. Al sumar estos costos obtendremos el costo nivelado de generación total para el proyecto, en este caso, el costo será de **7.13 [¢\$/kWh]**, con el cual compararemos con algunos costos reportados por algunas plantas de generación de México.

# CAPÍTULO V CONCLUSIONES

## CAPÍTULO V.-CONCLUSIONES

La energía geotérmica es una de las fuentes renovables disponibles en México, que se puede utilizar con muchas ventajas económicas y ambientales. Su exploración y desarrollo requiere de una serie de estudios técnicos y científicos que involucran a distintas disciplinas, además de una inversión considerable. En México La energía geotérmica juega un papel importante al contar con zonas estratégicas para el aprovechamiento de este recurso a gran escala. Actualmente México cuenta con bastante experiencia en la generación geotérmica.

La creación de un proyecto geotérmico es muy complejo, por tanto se requerirá de estudios a detalle que permitan conocer las características de la zona en cuestión y de esta manera la toma de decisiones será acertada.

Por otra parte, también se deberán considerar los aspectos medioambientales y sociales que pudieran afectar de una u otra forma las poblaciones de la zona.

Los costos de generación geotérmica a nivel mundial se encuentran entre 5 y 10  $\text{USD/kWh}$ . Para el caso de México, específicamente para el campo de Los Azufres en Michoacán y Cerro Prieto en Baja California: Reportan costos de generación de entre 8.84 y 9.24  $\text{USD/kWh}$ . Estos costos son altamente dependientes de las características del área a explotar.

El costo calculado para la zona de San Marcos Jalisco es de **7.13  $\text{USD/kWh}$**  para una planta de generación geotérmica con una potencia instalada de 21 MW, siendo este un valor que se encuentra dentro del rango reportado para la energía geotérmica y a opinión de los expertos en materia un valor aceptable y realista .

El costo nivelado al cual se llegó sin duda es un valor estimado que debe ser considerado, sin embargo, no se puede tomar como exacto pues los costos pueden variar. Por otro lado es necesario considerar las externalidades para la generación ya que estos también influyen en el resultado. Para tener una idea de qué podría pasar si se elevan o bajan los costos, se deberá realizar un análisis de sensibilidad para hacer una comparación y saber en qué casos el proyecto dejaría de ser viable.

La potencia geotérmica posible a instalar será de 21 MW, para tener una idea más apegada al potencial se deberán realizar más estudios en la zona. Sin embargo este potencial siempre será una estimación aproximada debido a que la parte de exploración geotérmica de donde se toman los datos para la evaluación tiene su grado de

incertidumbre y es muy difícil saber qué es lo que se encuentra y ocurre a grandes profundidades.

Se puede concluir de acuerdo a este estudio que la construcción y puesta en marcha de una planta de generación geotérmica para la zona de San Marcos Jalisco, es técnica y económicamente viable.

## **ANEXOS**

### **EL RÉGIMEN JURÍDICO DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS EN MÉXICO**

#### **I. Introducción**

El principal enfoque de éste escrito es señalar las lagunas legales en las que se encuentra inmersa la Energía Geotermoeléctrica. La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y la Ley de Aguas Nacionales carecen de precisión en la normatividad que debe de respetar la Geotermia (exploración, construcción, extracción y generación). Se necesita una nueva ley que ate todos los cabos sueltos, que reconozca el subsuelo como recurso natural, para proteger los yacimientos geotérmicos y su riqueza.

#### **II. Geotermia**

Un yacimiento geotérmico contiene agua salina (de temperatura y presión elevadas) atrapada entre la roca, la cual evita que salga a la superficie; y se encuentra cerca de un magma (hasta de 700°C), el cual le transfiere calor (energía).

La rentabilidad de un yacimiento es determinada por: la entalpía (calor u energía del fluido), la porosidad, la permeabilidad y la transferencia de calor (de la roca).

La clasificación de los fluidos y yacimientos geotérmicos es la siguiente:

- De alta entalpía (temperatura mayor o igual a 150°C).
- De mediana entalpía (temperatura menor a 150°C pero mayor a 60°C).
- De baja entalpía (temperatura menor a 60°C).

La extracción de fluido (mezcla de agua y vapor) del yacimiento se lleva a cabo a través de un pozo; el vapor es el encargado de hacer rotar las alabes del turbogenerador produciendo energía eléctrica; mientras que el líquido puede ser reinyectado al yacimiento (pozos inyectores) o dirigido a un ciclo binario.

Los ciclos binarios producen electricidad mediante el uso de un fluido de bajo punto de ebullición, dicho fluido absorbe el calor del agua extraída del yacimiento (evaporándose); y es dirigido a un turbogenerador, después condensará e iniciará el ciclo (cerrado) de nuevo.

#### **III. Régimen Jurídico de los Recursos Naturales en México**

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos dicta que el Estado tiene el dominio de los recursos naturales ubicados en el territorio nacional, pero el subsuelo no

es considerado recurso natural (exceptuando los yacimientos petroleros); por lo tanto puede ser explotado con libertad, a menos que la población lo requiriese.

También aclara que la generación, conducción, transformación, distribución y abastecimiento de energía eléctrica corresponde exclusivamente a la CFE.

La ley de Aguas Nacionales establece concesiones para la explotación y uso de los yacimientos acuíferos, siempre y cuando se precise: volúmenes de extracción y descarga, los derechos de los concesionarios y disposiciones especiales.

Finalmente, la CFE debe de cumplir con: los requerimientos impuestos por la Ley de Aguas Nacionales, autorización de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y solicitar el consentimiento de CONAGUA para: construir pozos, reinyectar, certificado de calidad de agua y concesión de aprovechamiento de aguas subterráneas.

#### IV. Carencia de Regulación Legal de los Recursos Geotérmicos

La labor fundamental de la Ley de Aguas Nacionales es cuidar la calidad y cantidad del vital líquido en el país, pero no toma en cuenta, que el fluido extraído no cumple inicialmente con dichas propiedades físicas y químicas.

Por último, se debe de concientizar que la extracción de aguas geotérmicas extralimita a la normatividad mexicana, se requiere una propia ley que establezca los parámetros de la explotación geotérmica y todo lo que ésta envuelve para la producción de energía eléctrica; con el fin de proteger los yacimientos geotérmicos, y así, los recursos naturales del subsuelo mexicano.

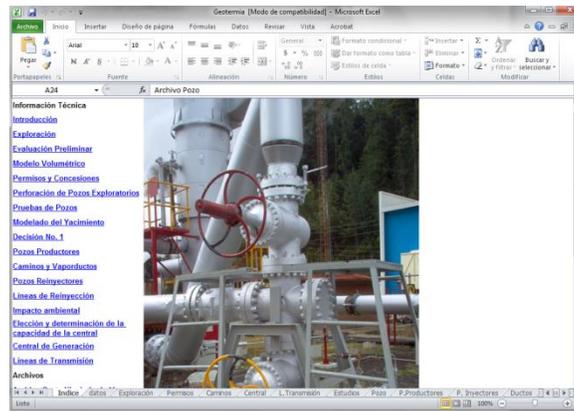
Programas

Método volumétrico USGS

Parámetro	Unidades	Valor	X (P)	Aleatorio	X0	X1	X2	Minimo	Esperado	Maximo
3 Vida del Proyecto	años	23	23	0.148	20	25	30			
4 p sep	Bar	10	9.8	0.337	9	10	11			
5 Area	km2	3	3	0.424	2	3.0	4			
6 Espesor	km	0	0	0.395	0.4	0.5	0.6			
7 Temperatura yacimiento	°C	256	256	0.671	230	260	280			
8 Temperatura ambiente	°C	24	24	0.754	11	21	30			
9 Humedad Relativa	%	0	39%	0.079	29%	53%	78%			
10 Porosidad	%	0	11%	0.677	5%	10%	15%			
11 Densidad de roca	kg/m³	2671	2674	0.272	2600	2700	2800			
12 Cr	kJ/kg K	1	1	0.646	0.8	1.0	1.1			
13 Rg	%	0	14%	0.709	5%	13%	20%			
14 Densidad de agua	kg/m³	790								
16 Cp agua	kJ/kg K	4.9								
16 h yacimiento	kJ/kg	1113								
17 pc	kJ/m³ K	2711								
18 Volumen	km³	1.4								
19 Q	KJ	1.3E+14								
20 Masa	kg	1.3E+11								
21 Masa aprovechable	kg	2.3E+10								
22 Potencia	MW	14								
26 X sep	%	17.6%	2776.422263	759.0608974	364	2017.36137	0.17569072			
27 Eficiencia Central	%	21%								
28 CE	ton/MWh	6.47								

## GEOCOST

	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1											
2											
3	[US\$Pozo]	2,000,000			Potencia de la Planta	[MW]	21				
4	[1]	25.0%			Costo de Central	[US\$/kW]	2,000				
5	[1]		2		Explotación	[US\$]	3,000,000				
6	[US\$/MVAño]	45,000			Infraestructura Caminos	[US\$/Km]	100,000				
7	[US\$/MWh]	0.04			Kilometraje Caminos	[Km]	10				
8	[US\$Pozo]	800,000			Líneas Transmisión	[US\$/m-c]	180,000				
9	[1]	15.0%			Kilometraje Líneas	[Km-c]	21				
10	[1]		1		No. De Pozos Exploratorios	[1]	3				
11	[US\$Pozo]	2,500,000			Perforación Exploratoria	[US\$Pozo]	6,000,000				
12	[1]	10.0%			No. De Pozos Productores	[1]	3				
13	[1]		1		No. De Pozos Fallidos	[1]	6				



## BIBLIOGRAFÍA y REFERENCIAS

- Quijano, José Luis., (2007) **“Manual de Geotermia”**. Ciencias de la Tierra e Ingeniería de Reservorios
- Secretaría de Energía **“Prospectiva del sector eléctrico 2010-2025”** México
- Hiriart Le Bert, Gerardo.2011 **“Evaluación de la energía geotérmica en México”** Reporte para el BID
- Guillén Solís, Omar (2004) **“Energías Renovables”** Trillas
- Dickson, Mary H. y Fanelli Mario **“Qué es la energía geotérmica”** Istituto di Geoscienze
- j.l. sierra, g. Pedro, (1998), **“Energía geotérmica”**
- Cuellar y González (2010) **“Reporte de prácticas profesionales de Geofísica”** UNAM
- Iglesias et al, (2005), **“Estimación del recurso y Prospectiva tecnológica de la Geotermia en México”** Instituto de Investigaciones Eléctricas
- Hiriart Le Bert, Gerardo (2011) **“Tecnologías de punta y costos asociados para generación distribuida, autoabastecimiento y cogeneración con recursos geotérmicos en México”** ESMAP
- Espíndola S., (2006), **Viabilidad Económica de Proyectos Geotermoeléctricos, un Enfoque Integral**, Tesis de licenciatura, Facultad Ingeniería UNAM, México.
- Hernández Galan, José Luis (1985) **“La energía de la Tierra”** Instituto de investigaciones Eléctricas
- Unidad de planeación minero energética -UPME(2003), **“Utilización de la energía geotérmica”**, Unión Temporal ICONTEC – AENE, Bogotá
- **Informe Geotermia.**, (2011) Asociación Cluster da Xeotermia Galega
- Arellano Gómez, Víctor. (1999), **“Geotermia”** Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas. pp. 223-232
- Maya González,Raul y Gutiérrez Negrín (2007) **“Recursos geotérmicos para generar electricidad en México”** Revista digital universitaria.
- Gustavo Alonso, J., Ramón Ramírez, Javier C. Palacios **“Análisis de costos nivelados de la generación de electricidad en México”** Boletín Energético N.18, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México
- Carolina Quiroz J.,Dana Sasse, Sara Ramírez S., Armando Gómez G., Heber. Y. Parra H., Alejandro Miranda V., Alberto Elizalde B. **“Externalidades en la generación de energía eléctrica en México”** GTZ México, Goodrich and Riquelme Asociados, GIESE, IGTEA.
- Hiriart, Le Bert Gerardo.**“Generación de energía eléctrica Una opción limpia y sustentable”**
- Hiriart, Le Bert Gerardo y Espíndola Hernandez, Salvador. **“Nuevas Tecnologías de generación eléctrica limpia en el ámbito global”** Instituto de Ingeniería, UNAM

## Referencias internet (2012)

- <http://www.energiandina.cl/2010/10/descripcion-de-la-geotermia-como-fuente-de-energia-2/>
- <http://www.emagister.com/curso-centrales-energia-geotermica-2-2/energia-geotermica-sistemas-ciclo-binario>
- [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742009000300007&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742009000300007&script=sci_arttext)
- <http://www.arqhys.com/articulos/calefaccion-geotermica.html>
- <http://www.renovablesverdes.com/la-geotermia-el-calor-de-las-rocas/>
- <http://geothermgeek.wordpress.com/historia/>
- <http://www.cfe.gob.mx/QUIENESSOMOS/ESTADISTICAS/Paginas/Indicadoresdegeneraci%C3%B3n.aspx>
- <http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/estadisticas/listadocentralesgeneradoras/Paginas/Geotermoelectrica.aspx>
- <http://quimica-ie-2011.wikispaces.com/ENERG%C3%8DA+GEOT%C3%89RMICA>