



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS  
DE BAJA ENTALPÍA: UNA OPCIÓN  
EN LA GENERACIÓN ELÉCTRICA  
Y LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO MECÁNICO**

PRESENTA:  
**OZIEL GARCÍA JAIMES**



DIRECTOR DE TESIS:  
Dr. Gerardo Hiriart Le Bert

*Ciudad Universitaria, México D.F., Febrero de 2008*



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mis padres; por el cariño, las enseñanzas y el apoyo incondicional que siempre me han brindado, pero sobre todo, por confiar y creer en mí*

*A mis hermanos; por haber contribuido en gran medida en mi formación como persona y por haberme dado ánimos para lograr muchos de mis objetivos*

*A mis amigos de la facultad y de SAFIR, Liz, Mari, Memo, Cyna, Cuau, David, Luis, Quique, Rod, Noemí, Ma. Elena, Juan Carlos, Iván y Poncho; por haber hecho inolvidable mi estancia en la universidad, disfrutando de tantas buenas experiencias y echándonos la mano en las malas*

*A mis amigos del museo, Josué, Ariana, Iris, Michel, Cinthya, Ricardos y Cony; por haber sido como una segunda familia y haberme regalado tantos momentos de alegría, gracias por apoyarme en mis momentos difíciles*

*A Betzita; por haber cambiado el rumbo de mi vida en la universidad, por haberme enseñado tantas cosas y por haber hecho tan especial esa etapa*

*A Martín; por haber sido más que un amigo, más que un compañero, más que un cómplice, gracias por apoyarme y alentarme para seguir adelante, mz...*

*A Pilar; por haberme adoptado durante mi vida universitaria y mostrarme que uno es capaz de lograr lo que se proponga, vamos por los noventa...*

*Al equipo IMPULSA; por el compañerismo y el apoyo que me brindaron, por las experiencias que viví a su lado, y en especial, gracias Salvador por los consejos que tanto me han ayudado*

*Al Dr. Gerardo Hiriart; por enseñarme a buscar la excelencia en el trabajo y aprovechar las oportunidades, por compartir sus consejos y experiencia, por enseñarme a tener una visión emprendedora*

*Y en especial, a la Universidad Nacional Autónoma de México; por abrirme las puertas y darme las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional y personal*

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
-------------------	---

## CAPÍTULO 1. LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

1.1 Antecedentes.....	3
1.1.1 Breve historia de la energía geotérmica.....	3
1.1.2 Situación actual.....	4
1.2 Recursos geotérmicos.....	6
1.2.1 Naturaleza de los recursos geotérmicos.....	6
1.2.2 Clasificación.....	7
1.2.3 Exploración, análisis y explotación.....	7
1.2.4 Aplicaciones directas de los recursos geotérmicos.....	8
1.3 Generación eléctrica.....	9
1.3.1 Ciclo a contrapresión.....	10
1.3.2 Ciclo a condensación.....	10
1.3.3 Ciclo de una evaporación instantánea.....	11
1.3.4 Ciclo de doble evaporación instantánea.....	12
1.3.5 Ciclo binario.....	12
1.4 La geotermia en México.....	13
1.4.1 Cerro Prieto.....	14
1.4.2 Los Azufres.....	15
1.4.3 Los Humeros.....	15
1.4.4 Las Tres Vírgenes.....	16

## CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍAS DE DESALACIÓN

2.1 Antecedentes.....	17
2.1.1 Definición.....	17
2.1.2 Sistemas de desalación.....	19
2.1.3 Capacidad instalada a nivel mundial.....	20
2.2 Sistemas térmicos de desalación.....	21
2.2.1 Destilación de múltiple efecto (MED).....	22
2.2.1.1 Alimentación en serie.....	23
2.2.1.2 Alimentación en paralelo.....	23
2.2.2 Destilación instantánea de múltiple etapa (MSF).....	23
2.2.3 Destilación por compresión de vapor (VC).....	24
2.3 Sistemas de desalación con membranas.....	25
2.3.1 Ósmosis inversa (RO).....	25
2.3.2 Electrodiálisis (ED).....	26
2.3.3 Tabla comparativa de los diferentes sistemas de desalación.....	27
2.4 Tecnologías de desalación instaladas en México.....	27

## CAPÍTULO 3. SITUACIÓN ENERGÉTICA Y DE AGUA EN MÉXICO

3.1 La distribución de energía eléctrica en México.....	29
3.2 La distribución del agua en México.....	30
3.3 Los recursos geotérmicos de México.....	32
3.3.1 Estudio de los recursos geotérmicos de Baja California.....	35

## CAPÍTULO 4. PROPUESTAS PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA CON RECURSOS GEOTÉRMICOS DE BAJA ENTALPÍA

4.1 Consideraciones.....	39
4.2 Cálculo del potencial energético del recurso geotérmico.....	40
4.3 Ciclo binario convencional.....	42
4.4 Ciclo binario con una evaporación <i>flash</i> .....	49
4.5 Ciclo binario con doble evaporación <i>flash</i> .....	56

## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS PARA LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR CON LA ENERGÍA CALORÍFICA DEL AGUA GEOTÉRMICA

5.1 Consideraciones.....	60
5.2 Análisis de un sistema MSF.....	61
5.3 Análisis de un sistema MED.....	65

## CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

6.1 Análisis de resultados.....	69
6.1.1 Generación eléctrica.....	69
6.1.2 Desalación.....	71
6.2 Conclusiones.....	73

## ANEXOS

Anexo 1. Cálculo del área de intercambio y volumen del intercambiador de calor.....	75
Anexo 2. Simulación en hoja de cálculo del sistema MSF con agua geotérmica a 78 °C.....	78
Anexo 3. Simulación en hoja de cálculo del sistema MED con agua geotérmica a 78 °C.....	79

GLOSARIO.....	80
---------------	----

REFERENCIAS.....	81
------------------	----

## INTRODUCCIÓN

En México, ante la creciente demanda de energía eléctrica sustentable, económica y segura en el suministro, es cada día más apremiante la búsqueda y propuesta de sistemas de generación y cogeneración más eficientes, que aprovechen los recursos del país y que den solución a los requerimientos de la población tanto presente como futura.

Actualmente, los recursos energéticos empleados para la generación eléctrica son en su mayoría combustibles fósiles, cuyo costo se ve afectado por la explotación de las reservas mundiales de petróleo, más escasas y costosas día con día. Por ello, las energías alternas han adquirido gran importancia, pues ayudan a reducir la inestabilidad de los precios, diversificar el portafolio energético e impulsar el desarrollo sustentable de los países; además de contribuir en la reducción de emisiones contaminantes.

Asimismo, es muy importante la contribución de estas fuentes en el desarrollo de áreas donde la energía convencional no es económicamente viable, como en zonas rurales apartadas de la red eléctrica. Indudablemente, estudiar, desarrollar y adaptar nuevas tecnologías energéticas ha dejado de ser una actividad de carácter científico en los países desarrollados, para convertirse en una necesidad a nivel mundial.

En este contexto, México posee una gran cantidad de recursos energéticos, alternos a los fósiles, que pueden ser aprovechados para satisfacer la demanda eléctrica y otras necesidades. Entre los recursos naturales actualmente estudiados y utilizados en el país se encuentra la energía geotérmica, cuyo potencial energético es inmenso y cuya explotación, debido a factores naturales, es viable en nuestra nación.

México cuenta actualmente con cuatro centrales geotérmicas de generación eléctrica, que contribuyen con el 3.24% de los más de 49,000 MW de capacidad instalada en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Esta cifra puede parecer poco relevante considerada en el contexto nacional, pero a nivel local, la generación del campo geotérmico de Cerro Prieto, por ejemplo, satisface más de la mitad de la demanda de electricidad de la red de Baja California, que es una red de transmisión aislada de la red eléctrica nacional.

El aprovechamiento de este tipo de energía es el objetivo principal del presente trabajo de tesis, en el que se propone a los recursos geotérmicos de baja entalpía, localizados con abundancia en la península de Baja California y en otras regiones del país, como parte de un esquema de generación eléctrica con pequeñas plantas que, en muchos casos, pueden

no estar conectadas a la red nacional. De igual manera, se analiza la viabilidad de utilizar la energía eléctrica generada, y la energía remanente en el fluido geotérmico, para la desalación de agua de mar y, de esta manera, contribuir en la distribución del agua potable, escasa en varias de las zonas estudiadas.

En el primer capítulo se describen de manera general los antecedentes de la energía geotérmica, su naturaleza y aplicaciones; haciendo énfasis en los procesos de generación eléctrica y señalando las características principales de la geotermia en México.

En el capítulo dos, se da un panorama sobre las tecnologías de desalación empleadas en la actualidad, se describe su funcionamiento y las aplicaciones en las cuales son utilizadas; a partir de ello se eligen los sistemas de desalación a analizar posteriormente.

Luego, en el capítulo tres, se mencionan las zonas del país en las cuales se han detectado manifestaciones geotérmicas y la información técnica hasta ahora recabada. Se notará que en varios de los lugares estudiados no se cuenta con energía eléctrica ni agua potable, por tratarse de pequeñas poblaciones alejadas. Es en estos lugares donde podrían aprovecharse los recursos geotérmicos para proveer de tales servicios a la comunidad.

Posteriormente, se analizan tres sistemas de generación eléctrica que podrían ser empleados en las zonas de estudio. Uno de ellos es un ciclo binario convencional, empleado comúnmente en plantas geotermoeléctricas, y los otros dos son ciclos binarios modificados, en los que se propone cambiar el método de evaporación del fluido de trabajo, con el objetivo de incrementar la potencia eléctrica entregada.

En el capítulo quinto se analiza la viabilidad técnica de desalar agua de mar mediante el uso de la energía calorífica sobrante en el proceso de generación eléctrica, se calcula la cantidad de agua destilada que podría producirse y se definen las características de los sistemas que se emplearían.

Finalmente, en el capítulo seis, se discuten los resultados obtenidos, tanto para generación eléctrica como para desalación, y se elaboran las conclusiones a las que se llega después de realizados todos los análisis.

# CAPÍTULO 1. LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

## 1.1 ANTECEDENTES

Los problemas actuales de contaminación y la crisis de los combustibles fósiles han aportado indudablemente un gran estímulo para el uso y desarrollo de nuevas energías, entre ellas la geotérmica. Con las técnicas disponibles en el presente puede explotarse el calor de la Tierra sólo en lo que se conoce como campos geotérmicos y acuíferos de bajo grado<sup>1</sup>, los cuales están confinados por la naturaleza a ciertas partes favorecidas de la Tierra. Pero tal parece que en los próximos años estará dentro de nuestro alcance la “creación” de campos donde éstos no existen en forma natural y la explotación de las inmensas reservas de calor hasta ahora consideradas como inaccesibles.

La energía térmica almacenada en el interior de nuestro planeta es tal que, si fuera explotada por completo, podría satisfacer la demanda mundial de electricidad por cientos de años. En el transcurso de un año, por ejemplo, aproximadamente  $4 \times 10^{17}$  kilojoules (kJ) ó 100,000 millones de megawatts-hora (MWh) de energía en forma de calor son transportados desde el interior de la Tierra hasta su superficie. Esta cantidad equivale a aproximadamente la energía eléctrica consumida en todo el planeta en los últimos 5 años. La principal dificultad que se encuentra al tratar de aprovechar eficientemente esta energía reside en su naturaleza difusa pues, finalmente, se trata de energía calorífica.

### 1.1.1 Breve historia de la energía geotérmica

El aprovechamiento de la energía geotérmica se ha llevado a cabo desde hace más de dos mil años. Se sabe que los romanos usaban las aguas termales de las orillas del río Danubio para la calefacción de sus conocidos baños. En pueblos como Chaudes Aygues, Dax y Ax-les-Thermes en Francia, se ha distribuido agua caliente a casi 80 °C para usos domésticos desde la edad media. Y en el siglo XVIII, un gran número de balnearios fueron fundados en Hungría con el fin de comercializar las virtudes terapéuticas de las aguas termales, muchos de los cuales siguen aún en servicio.

El principal adelanto que se logró con el aprovechamiento del calor terrestre se manifestó cuando el Príncipe Piero Ginori Conti promovió por primera vez la generación de energía

---

<sup>1</sup> Campo geotérmico: Área térmica en la que la presencia de formaciones de roca permeable abajo del terreno permite el alojamiento de un fluido de trabajo.

Acuífero de bajo grado: Fuente subterránea de agua caliente de bajo grado (hasta 70 °C) que puede encontrarse incluso en áreas no termales. Armstead, Energía geotérmica, 1989.



eléctrica a partir del vapor geotérmico; en Larderello, Italia, en 1904. El sistema diseñado por Conti, figura 1.1, empleaba un motor reciprocante accionado por el vapor separado del agua geotérmica. Con él se lograban producir cerca de 15 kW de potencia eléctrica en un generador de corriente directa. Posteriormente, el equipo fue reemplazado por un turboalternador de 250 kW, en 1913, con lo cual se inició la producción de electricidad a partir de recursos geotérmicos a nivel comercial.



*Figura 1.1 Primer motor usado para generación eléctrica con vapor geotérmico, y su inventor, Piero Ginori Conti*  
[IGA, 2003]

Los campos geotérmicos de Larderello poseían vapor como fluido dominante, por lo cual resultaron relativamente fáciles de explotar para la producción de electricidad. Sin embargo, en la gran mayoría de los campos existentes el fluido dominante es líquido. Uno de estos campos fue utilizado en la isla japonesa Kyushu, en 1925, para producir 1.12 kW de electricidad. Después de instalar esta pequeña unidad, los japoneses construyeron una planta de pruebas de 30 kW, en 1951, que estuvo en operación durante algunos años.

La explotación de los campos geotérmicos con líquido como fluido dominante se dio en mayor escala cuando se construyó la planta Wairakei, en Nueva Zelanda, en 1958, la cual contaba con una capacidad instalada de 192.6 MW. Posteriormente, otros países iniciaron con la exploración de sus recursos geotérmicos para la producción de electricidad, como Estados Unidos, Filipinas, México, Rusia, Japón, El Salvador y China, entre otros.

### *1.1.2 Situación actual*

El uso de la energía geotérmica en los países en vías de desarrollo ha tenido una interesante tendencia en los últimos años: entre 1975 y 1979, la capacidad geotermoeléctrica instalada en dichos países se incrementó de 75 a 465 MW. Después de 5 años, en 1984, la cifra ascendió a 1495 MW, con unas tasas de incremento de 500% y 223% para esos dos periodos, respectivamente. Y en los siguientes 16 años, de 1984 a 2000, hubo un incremento de casi 150%.

En la tabla 1.1 se enlistan los países que actualmente utilizan la energía geotérmica para generación eléctrica, y las capacidades que lograron en los años 1995, 2000 y 2003.

TABLA 1.1 Capacidad geotermoeléctrica instalada a nivel mundial  
[Huttrer, 2001. IGA, 2004]

País	Capacidad Instalada [MW]		
	1995	2000	2003
Estados Unidos	2816.7	2228	2020
Filipinas	1227	1909	1931
México	753	755	953
Indonesia	309.75	589.5	807
Italia	631.7	785	790.5
Japón	413.7	546.9	560.9
Nueva Zelanda	286	437	421.3
Islandia	50	170	200
Costa Rica	55	142.5	162.5
El Salvador	105	161	161
Kenia	45	45	121
Nicaragua	70	70	77.5
Rusia	11	23	73
Guatemala	-	33.4	29
China	28.78	29.17	28.18
Turquía	20.4	20.4	20.4
Portugal	5	16	16
Francia	4.2	4.2	15
Etiopía	-	7	7
P. N. Guinea	-	-	6
Austria	-	-	1.25
Tailandia	0.3	0.3	0.3
Alemania	-	-	0.23
Australia	0.15	0.15	0.15
Argentina	0.67	-	-
<b>Total</b>	<b>6833.35</b>	<b>7972.5</b>	<b>8402.21</b>

En 2005, la potencia instalada a nivel mundial de las centrales geotermoeléctricas alcanzó los 8,932 MW, y en ese mismo año, la Asociación Internacional de Geotermia (IGA, por sus siglas en inglés) pronosticó que para 2010 se tendrían 10,700 MW instalados.

Actualmente también se recurre a la geotermia como fuente de energía para usos distintos a la generación eléctrica, como calefacción y suministro doméstico de agua caliente, acondicionamiento de aire, calentamiento de cultivos agrícolas y criaderos de peces, y para procesos industriales que demandan vapor, entre otros. En el año 2000, la capacidad instalada a nivel mundial para los usos directos de la geotermia fue de 15,145 MW<sub>t</sub>.

Como se observa, la geotermia es una alternativa por la cual muchos países han estado optando, pues resulta una opción efectiva que compite con las demás formas de producción eléctrica, y que además, por ser tan versátil y tener un enorme potencial energético, puede ser empleada en un sinnúmero de procesos.

## 1.2 RECURSOS GEOTÉRMICOS

### 1.2.1 Naturaleza de los recursos geotérmicos

La energía calorífica existente dentro de la Tierra proviene, principalmente, del proceso mismo de formación del planeta y de la radiación emitida por elementos inestables en su interior. La energía es mayor en las zonas más profundas; la razón de cambio de la temperatura con la profundidad se denomina *gradiente térmico* y su valor promedio es de 3 °C/100m. Sin embargo, en algunas zonas este valor es mucho mayor, debido a fenómenos geológicos o volcánicos; es en estos lugares donde podría existir un yacimiento geotérmico utilizable, figura 1.2.

Para que un recurso geotérmico sea viable, debe existir un acuífero o depósito subterráneo de alta permeabilidad en proximidad a la fuente de calor, generalmente de origen volcánico. Por lo tanto, la utilización de esta energía se limita a zonas específicas del planeta donde las condiciones permiten el transporte del calor de zonas profundas a otras más cercanas a la superficie, a través de un fluido de trabajo (agua, vapor o ambos) alojado en el depósito. La fuente de calor puede encontrarse a profundidades de entre 3 y 10 km y poseer temperaturas entre los 500 y los 600 °C, mientras que el acuífero puede estar entre los 300 y los 2000 m de profundidad y alcanzar temperaturas de 400 °C.

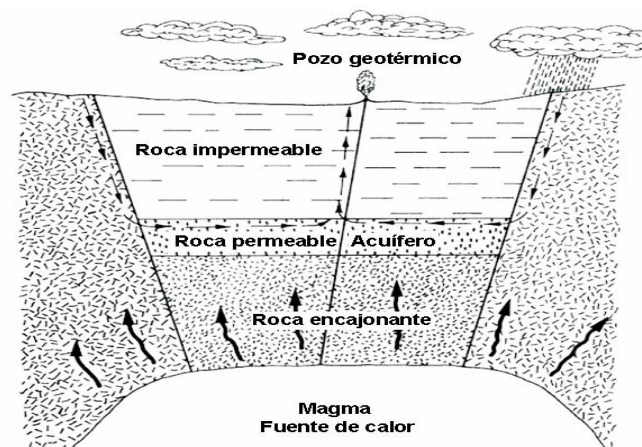


Figura 1.2 Yacimiento geotérmico  
[Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1999]

### 1.2.2 Clasificación

Uno de los criterios más utilizados para clasificar los recursos geotérmicos es el que se basa en la temperatura del fluido geotérmico. Con esta clasificación, se pueden dividir en recursos de baja, media o alta entalpía; como se observa en la tabla 1.2, según distintos autores. Este criterio es muy empleado porque permite percibir inmediatamente qué tanta energía podría ser extraída del fluido y en qué aplicaciones podría aprovecharse. En el presente trabajo se adoptará la clasificación hecha por Gunnlaugsson y Axelsson, en la que se consideran dos posibles categorías: recursos de baja o alta entalpía.

TABLA 1.2 Clasificación de los recursos geotérmicos según su temperatura  
[Muffler y Cataldi, 1978. Nicholson, 1993. Gunnlaugsson y Axelsson, 2000]

CLASIFICACIÓN	Muffler y Cataldi	Nicholson	Gunnlaugsson y Axelsson
Recursos de baja entalpía	< 90 °C	≤150 °C	≤190 °C
Recursos de entalpía intermedia	90-150 °C	-	-
Recursos de alta entalpía	>150 °C	>150 °C	>190 °C

Otra manera en la que se pueden dividir los recursos geotérmicos es mediante la distinción de la fase en la que se encuentra el fluido<sup>2</sup>; de esta manera pueden clasificarse como recursos geotérmicos con agua líquida como fluido dominante, o recursos geotérmicos con vapor como fluido dominante.

### 1.2.3 Exploración, análisis y explotación

Antes de iniciar el proceso de extracción del fluido de trabajo en un yacimiento geotérmico, es necesario llevar a cabo una etapa de exploración, con la que se puede conocer el potencial energético del yacimiento y la factibilidad de explotación. Con los datos obtenidos en este proceso se puede definir el plan a seguir para el aprovechamiento del recurso o cancelar el proyecto si los resultados no son favorables.

En la fase de exploración preliminar se llevan a cabo cuatro clases de estudios: hidrológicos, con los que se puede modelar la circulación y almacenamiento de los fluidos en el subsuelo; geológicos, con los cuales se reconoce la estructura del terreno y el origen del yacimiento; geoquímicos, con los que se pueden inferir las características químicas del fluido; y geofísicos, que permiten obtener las características termodinámicas del reservorio.

<sup>2</sup> White, Characteristics of geothermal resources, 1973.

Una vez hecha la exploración preliminar, se inicia la perforación de los pozos exploratorios (usualmente 3, a más de 1000 m de profundidad), que sirven para obtener información precisa del yacimiento. Con esta información se pueden confirmar y perfeccionar las hipótesis y modelos elaborados en la exploración superficial, y verificar que el recurso geotérmico cumpla con los requerimientos necesarios para su utilización. Después se procede a la perforación de los pozos productores, cuya localización y número depende de la capacidad del proyecto y de la información hasta entonces recabada.

El diseño de los pozos productores dependerá de la profundidad a la que se encuentre el yacimiento y del tipo de roca a perforar. En proyectos geotermoeléctricos, el diámetro de la tubería de producción o ademe de pozo normalmente se estandariza a 9 5/8" y su profundidad promedio es de unos 2000 m. En estos casos, debido a las grandes presiones y esfuerzos térmicos alcanzados, la tubería necesaria para el pozo se divide en unas cinco partes, entre las que se encuentran la tubería de anclaje (de unos 50 m de largo) y la principal, o de producción (que llega hasta el yacimiento).

Con los pozos de producción y de reinyección perforados, y sus elementos instalados (válvulas, instrumentación, etc.), se pueden elaborar pruebas que permitan conocer su comportamiento ante diversas situaciones. La información obtenida en estas pruebas es fundamental para la futura operación del proyecto geotérmico. Finalmente, después de implementar el equipo necesario (dependiendo de las características del fluido y del proyecto), se puede iniciar la explotación del yacimiento para la aplicación planteada.

#### *1.2.4 Aplicaciones directas de los recursos geotérmicos*

Como se mencionó anteriormente, además de la generación eléctrica, la energía geotérmica también se utiliza en otras aplicaciones, en las que se aprovecha directamente el calor de los fluidos geotérmicos. Los recursos de entalpía baja son los que, generalmente, se emplean en tales casos. En la figura 1.3 se pueden observar algunos de los usos directos dados a los recursos geotérmicos, dependiendo de la temperatura a la que se encuentren. Nótese que la producción de energía eléctrica se realiza, usualmente, cuando la temperatura del recurso es mayor a 140 °C.

Un hecho importante es que, aunque las fuentes de entalpía baja no poseen la energía suficiente para generación eléctrica, éstas son mayores en cantidad que las de alta entalpía, y también representan un gran potencial energético. Además, su extracción se realiza a profundidades menores y, por lo tanto, a costos menores.

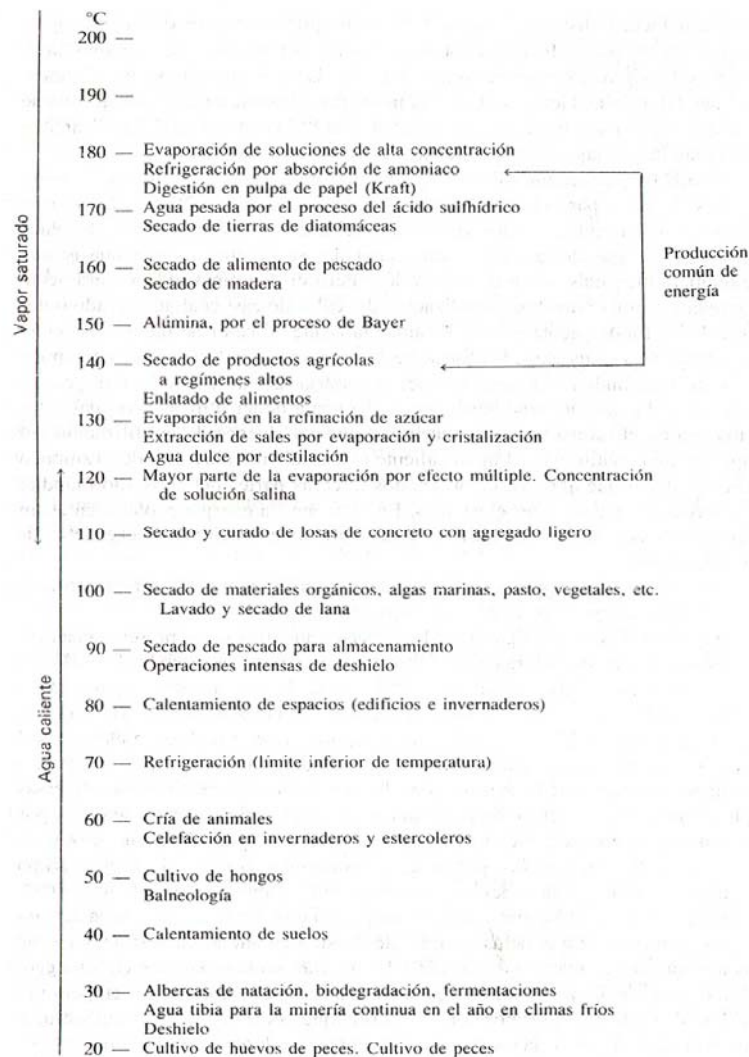


Figura 1.3 Requerimientos aproximados de temperatura de los fluidos geotérmicos para diversas aplicaciones [Lindal, 1973]

### 1.3 GENERACIÓN ELÉCTRICA

A pesar de la ineficiencia inherente al proceso de convertir calor en electricidad, impuesta por las restricciones termodinámicas, y del creciente desarrollo que han tenido las aplicaciones directas de los recursos geotérmicos, es probable que la generación eléctrica continúe siendo la forma más común del avance de la geotermia.

Los ciclos empleados para tal fin en las plantas geotermoeléctricas se describirán a continuación; no se hará mención del denominado *ciclo híbrido*, ya que éste resulta de la combinación del ciclo binario con alguno de los otros.

### 1.3.1 Ciclo a contrapresión

Éste es el más simple y barato en cuanto a inversión inicial de todos los ciclos geotérmicos. El vapor del pozo, ya sea directamente de los pozos secos o después de haber pasado por un separador, en el caso de los pozos húmedos, se hace pasar por una turbina y después se descarga directamente a la atmósfera, figura 1.4. Tales ciclos pueden consumir aproximadamente el doble de vapor (para la misma presión de admisión y potencia generada) que los ciclos a condensación; por lo tanto, el número de pozos necesarios es mayor, y los costos involucrados en perforación también.

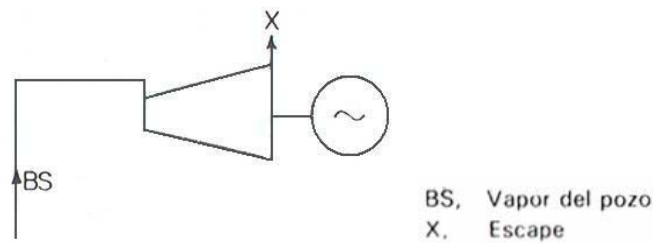


Figura 1.4 Ciclo a contrapresión  
[Armstead, 1989]

A pesar de esto, tienen sus aplicaciones como plantas piloto, plantas de reserva, para pequeños suministros locales de pozos aislados e incluso (aunque en grado muy limitado), para cubrir las cargas máximas. También se emplea este ciclo si el contenido de gases no condensables en el vapor es muy elevado (mayor del 50%) y, por lo general, se utilizan con preferencia sobre los ciclos a condensación para contenidos de gases que exceden el 10%, debido a la alta energía que se requiere para extraer estos gases en un condensador.

### 1.3.2 Ciclo a condensación

En este ciclo, la descarga del vapor, después de haber realizado trabajo, no se hace directamente a la atmósfera. El vapor de escape se hace pasar por un condensador (como no hay necesidad de recuperar el condensado para fines de alimentación, normalmente se usan condensadores de contacto directo) acoplado a la turbina y, después de condensarse, es llevado a una torre de enfriamiento, donde parte de él se pierde por evaporación. El fluido enfriado se emplea posteriormente como agua de enfriamiento en el condensador.

A veces es necesario utilizar condensadores superficiales, en lugar de los de contacto directo, si se considera que la naturaleza y la concentración de los gases no condensables

presentan riesgos para el ambiente local. El uso de un condensador hace que la energía extraída del fluido geotérmico sea mayor y que la eficiencia se incremente. En la figura 1.5 puede observarse el esquema de este ciclo.

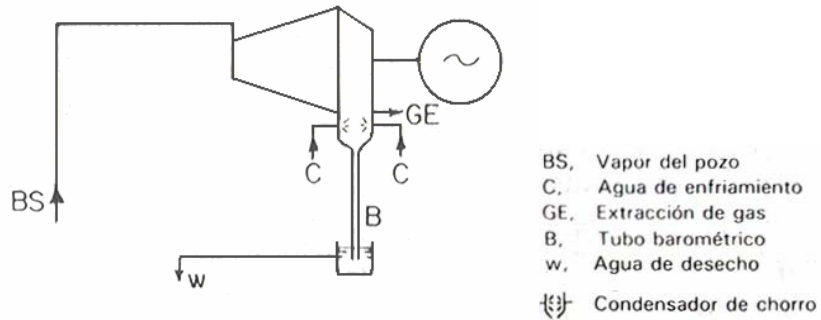


Figura 1.5 Ciclo a condensación  
[Armstead, 1989]

### 1.3.3 Ciclo de una evaporación instantánea

En los campos húmedos es posible extraer una muy buena cantidad de energía adicional del agua líquida caliente, separada previamente de la mezcla del pozo, haciéndola pasar a un recipiente de evaporación instantánea que trabaje a presión menor que aquella a la que se admite el vapor principal a la turbina. El vapor así producido puede hacerse pasar luego por las etapas de menor presión de la o las unidades motrices primarias, tal configuración es la del ciclo con doble evaporación instantánea, figura 1.6.

En teoría, puede obtenerse la máxima producción de energía del agua caliente si el recipiente de evaporación instantánea trabaja a una temperatura que sea aproximadamente el promedio de la del agua caliente recolectada y la del condensador. La fracción del agua caliente no evaporada se dirige luego a la tubería de deshecho y se le da algún uso industrial o de otra clase.

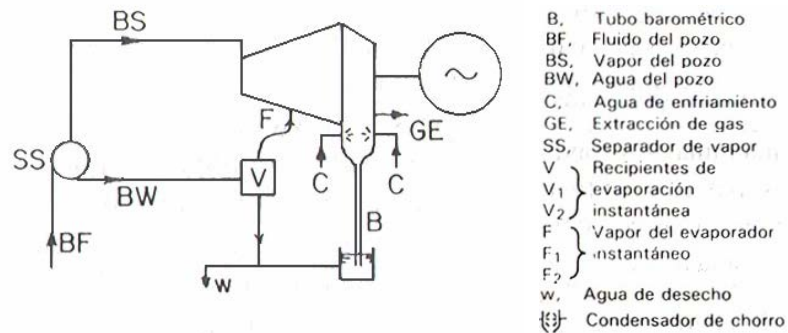


Figura 1.6 Ciclo de una evaporación instantánea  
[Armstead, 1989]



### 1.3.4 Ciclo de doble evaporación instantánea

En condiciones ideales se extraería la energía máxima del agua caliente separada, en un campo húmedo, utilizando un número infinito de recipientes de evaporación instantánea conectados en cascada o, en todo caso, utilizando un recipiente de evaporación para cada etapa de cada turbina; pero tal procedimiento sería económicamente absurdo.

Puede ser útil, en ocasiones, tener dos recipientes de evaporación instantánea, como se ilustra en la figura 1.7, trabajando lo más cerca posible a temperaturas iguales a un tercio y a dos tercios del intervalo comprendido entre la temperatura del agua caliente recolectada y la temperatura del condensador. De esta manera se logra una configuración de doble evaporación instantánea.

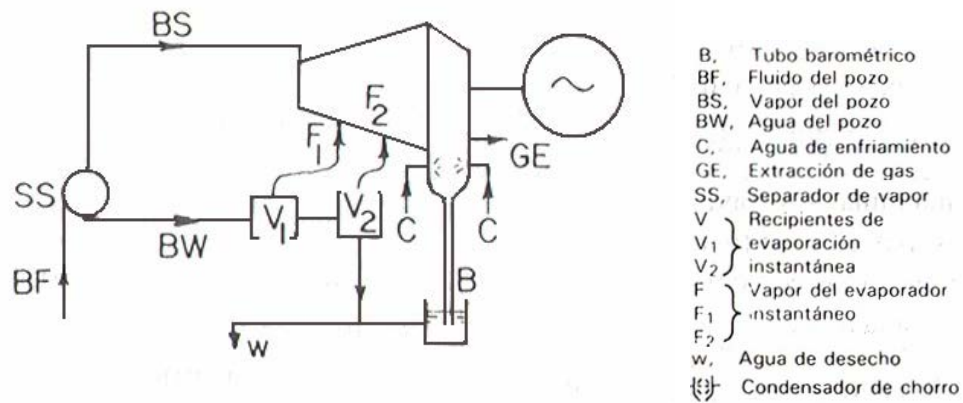


Figura 1.7 Ciclo de doble evaporación instantánea  
[Armstead, 1989]

### 1.3.5 Ciclo binario

En este ciclo, parte de la energía calorífica del fluido geotérmico es cedida en un intercambiador de calor a un fluido secundario, generalmente un refrigerante como isobutano o isopentano, cuyo punto de ebullición es bajo, 28 y -12 °C para los ejemplos citados, respectivamente.

El fluido secundario transita por un circuito cerrado. Después de ser evaporado se hace pasar por la turbina, realiza trabajo y luego es enfriado en el condensador hasta llegar a la fase líquida, para ser bombeado y reincorporado nuevamente al ciclo, figura 1.8. El agua que se utiliza en el condensador es proporcionada por una torre de enfriamiento, y el fluido geotérmico que ha cedido su calor se manda a un pozo de reinyección.

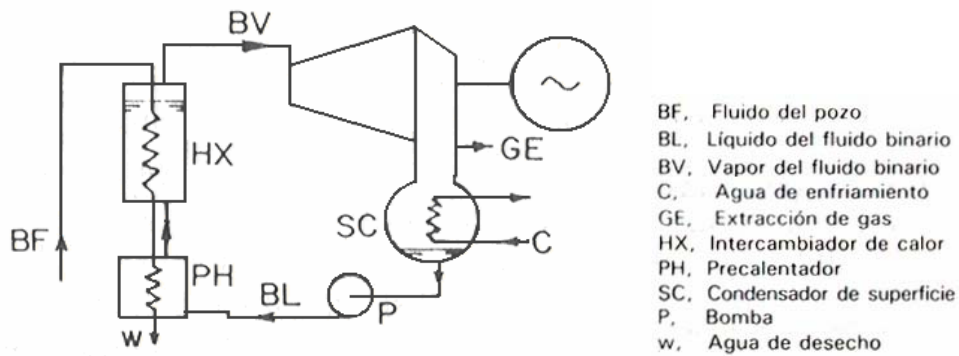


Figura 1.8 Ciclo binario  
[Armstead, 1989]

En muchas plantas geotermoeléctricas se aprovecha la energía residual del agua líquida caliente en unidades de este tipo.

Las ventajas que presenta el ciclo binario son:

- Se pueden aceptar mezclas de agua-vapor sin hacer su separación.
- Los problemas de agresividad química se confinan al intercambiador únicamente.
- Se puede extraer más calor de los fluidos geotérmicos, desechándolos a una temperatura más baja; y, en consecuencia, se pueden emplear yacimientos de temperaturas más bajas que en los ciclos de evaporación instantánea.

Sin embargo, presenta inconvenientes como la necesidad de usar intercambiadores de superficie que son costosos y de baja eficiencia, además de que emplea fluidos refrigerantes volátiles, a veces tóxicos o inflamables, y que necesita grandes cantidades de agua de enfriamiento.

#### 1.4 LA GEOTERMIA EN MÉXICO

México ocupa el tercer lugar mundial en cuanto al aprovechamiento de los recursos geotérmicos para generación eléctrica, con una capacidad instalada de 953 MW. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) opera actualmente cuatro campos geotérmicos: Cerro Prieto, en Baja California, con 720 MW; Los Azufres, en Michoacán, con 188 MW; Los Humeros, en Puebla, con 35 MW; y Las Tres Vírgenes, en Baja California Sur, con 10 MW, figura 1.9. La capacidad geotermoeléctrica de México representa el 2.5% de los más de 38,000 MW de capacidad instalada en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN).



Figura 1.9 Campos geotérmicos en México  
[Comisión Federal de Electricidad, 2006]

Las principales características de las centrales geotermoelectricas instaladas en el país se mencionan a continuación.

#### 1.4.1 Cerro Prieto

Es el segundo campo más grande del mundo, se ubica en la parte norte del país, cerca de Mexicali, BC. Es un campo del tipo sedimentario (con los fluidos geotérmicos contenidos en rocas areniscas), asociado a la prolongación sur de la falla de San Andrés y alojado en una cuenca transtensional, cuyas primeras unidades turbogeneradoras empezaron a operar desde 1973. Hay un promedio de 164 pozos en producción continua, con profundidades promedio de 2,500 metros, que suministran alrededor de 50 millones de toneladas de vapor al año. Durante 2005, generó más de 5,500 GWh de energía. Figura 1.10.



Figura 1.10 Central geotermoeléctrica Cerro Prieto  
[Comisión Federal de Electricidad, 2006]

#### 1.4.2 Los Azufres

Está localizado en la parte central de México, en el estado de Michoacán, a 2,800 metros de altitud. Es un campo de tipo volcánico, ubicado en la Faja Volcánica Mexicana, y cuyos fluidos geotérmicos están contenidos en rocas de tipo andesítico. Cuenta con una unidad a condensación de 50 MW y cuatro de 25 MW, siete unidades a contrapresión de 5 MW y dos unidades de ciclo binario de 1.5 MW. Estas unidades son alimentadas con un promedio de 14.6 toneladas de vapor al año por 37 pozos productores. Figura 1.11.



*Figura 1.11 Central geotermoeléctrica Los Azufres*  
[El autor]

#### 1.4.3 Los Humeros

Este campo volcánico se ubica en la parte oriental de la Faja Volcánica Mexicana, en los límites de los estados de Puebla y Veracruz, a unos 2,600 metros de altitud. Aquí también son rocas andesíticas las que alojan a los fluidos geotérmicos. Están instaladas siete unidades turbogeneradoras a contrapresión, con una capacidad total de 35 MW. En 2005 estas unidades generaron 291 GWh, y fueron alimentadas por los 4.4 millones de toneladas de vapor que produjeron sus 18 pozos. Figura 1.12.



*Figura 1.12 Central geotermoeléctrica Los Humeros*  
[El autor]

#### 1.4.4 Las Tres Vírgenes

Es un campo volcánico, localizado hacia la mitad de la península de Baja California, asociado a un complejo de tres volcanes cuaternarios y a los movimientos tectónicos que separan a la península del resto del continente. Sus fluidos geotérmicos están alojados en rocas intrusivas. En 2001 se instalaron en este campo dos unidades turbogeneradoras a condensación de 5 MW cada una, que durante 2005 fueron alimentadas con 475,000 toneladas de vapor con las cuales se generaron casi 37 GWh. Figura 1.13.



Figura 1.13 Central geotermoeléctrica Las Tres Vírgenes  
[El autor]

El potencial geotérmico de México es todavía mayor: en el campo de Cerritos Colorados, ubicado en la periferia de la ciudad de Guadalajara, Jalisco, la CFE ha perforado varios pozos productores, calculándose un potencial de 75 MW; en el campo geotérmico de Cerro Prieto está programado un proyecto de 100 MW; y en Los Humeros, se planea incrementar la capacidad en 51 MW.

Adicionalmente, en México se conocen otras zonas geotérmicas atractivas, en las que se están llevando a cabo programas de exploración. Entre estas zonas se encuentra Acoculco, en el estado de Puebla; La Soledad, en Jalisco; y la zona del Domo San Pedro, en Nayarit. Otras zonas de interés son las de Maguarichic, en Chihuahua; las de Bahía Concepción, en Baja California Sur; y la del volcán Tacaná, en Chiapas.

Como se observa, el aprovechamiento de los recursos geotérmicos es una alternativa viable y eficaz en la producción eléctrica y otras aplicaciones, pues representan un enorme potencial energético que puede ser explotado a costos cada vez más bajos.

## CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍAS DE DESALACIÓN

En el presente apartado, se describen de manera general los antecedentes y tecnologías de desalación empleadas en la actualidad, con el fin de dar una introducción a los sistemas de desalación que serán estudiados en el capítulo 4 del presente trabajo de tesis. Una vez analizada la viabilidad de generar electricidad mediante el aprovechamiento de los recursos geotérmicos, se estudiará la posibilidad de emplear la energía remanente en el fluido geotérmico, y en el agua de enfriamiento, para la desalación de agua de mar mediante los sistemas térmicos de desalación descritos en este capítulo.

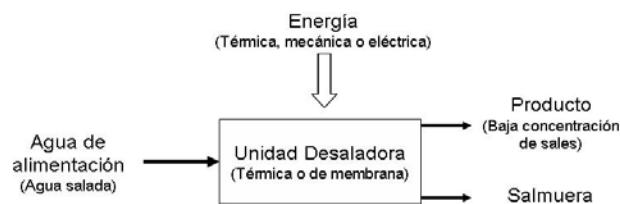
### 2.1 ANTECEDENTES

La desalación del agua de mar en varias regiones del mundo, por ejemplo, en los países del Golfo Pérsico y en varias islas del Caribe y del Mediterráneo, se ha convertido en una actividad indispensable para el suministro de agua potable a las comunidades. Actualmente, cerca del 40% de la población mundial presenta problemas de escasez de agua, y se pronostica que esta cifra se incremente al 60% para el año 2025.

Además de proveer agua potable, la desalación también se utiliza en procesos que demandan agua muy pura, libre de sales y partículas, como en las plantas termoeléctricas (que emplean agua desmineralizada), en farmacéutica, o en electrónica. Asimismo, se puede recurrir al proceso de desalación en actividades que no sean tan rigurosas en cuanto a la calidad del agua que necesitan, como en la irrigación o el enfriamiento industrial.

#### 2.1.1 Definición

El término desalación se refiere a los procedimientos mediante los cuales se extrae, del agua de alimentación, el exceso de sales y minerales. El resultado del proceso es un producto con baja concentración de sales y un rechazo, o salmuera, cuya concentración es mayor a la del agua de alimentación, figura 2.1. La energía empleada puede ser mecánica, térmica o eléctrica; y las unidades de desalación pueden ser térmicas o de membrana.



*Figura 2.1 Proceso de desalación*  
[El-Dessouky y Ettouney, 2002]

El agua producida, dependiendo del uso que se le vaya a dar, debe contar con un límite máximo de sales disueltas; por ejemplo, el agua desmineralizada debe contener como máximo 0.3 ppm<sup>3</sup>, el agua para consumo humano 1000 ppm, para actividades domésticas se puede emplear agua con poco más de 1000 ppm, etc. De acuerdo a la concentración salina, el agua se clasifica en distintos tipos, tabla 2.1.

TABLA 2.1 Rangos de salinidad de los diferentes tipos de agua  
[Fariñas, 1999. Medina, 2000]

Tipo de Agua	Salinidad (ppm)
Ultrapura	0.03
Desmineralizada	0.3
Desionizada	3
Dulce (Potable)	< 1,000
Salobre	1,000 - 10,000
Salina	10,000 - 30,000
Marina	30,000 - 50,000

El producto obtenido mediante los distintos procesos de desalación es, generalmente, más puro que lo establecido en las normas para el agua potable; es por ello que, cuando el agua es destinada al consumo humano, el producto debe ser tratado para ajustar la cantidad de minerales necesarios y su pH.

El agua a desalar puede provenir del mar o de alguna otra fuente, como agua salobre subterránea, por ejemplo; la concentración de sales disueltas que posea dependerá de su origen, como se observa en la tabla 2.2. En los sistemas térmicos de desalación, la energía necesaria para desalar el agua es prácticamente la misma, aunque la salinidad varíe; sin embargo, en los sistemas que emplean membranas, la energía requerida es mayor conforme la concentración de sólidos y sales disueltas aumenta.

TABLA 2.2 Salinidad media de los principales océanos y mares  
[Qdais, 1999. Hanbury, Hodgkiess y Morris, 1993. Medina, 2000]

Mar / Océano	Salinidad (ppm)
Mar Báltico	28,000
Océano Pacífico	33,600
Océano Atlántico Sur	35,000
Mar Mediterráneo	36,000
Mar Rojo	44,000
Golfo Pérsico	43,000 - 50,000
Mar Muerto	50,000 - 80,000

<sup>3</sup> ppm: partes por millón, en peso; si el agua presenta 1,000 ppm de sales disueltas, significa que el 0.1 % (1,000/1,000,000) de su peso total proviene de dichas sales.

Los componentes principales encontrados en el agua de mar incluyen iones de sodio, calcio, potasio, magnesio y cloro, entre otros. En la tabla 2.3 se muestra la composición típica del agua de mar con una salinidad de 36,000 ppm. Además de estos elementos, también se puede encontrar gran variedad de materia suspendida, como arena, arcilla, microorganismos, virus y coloides. Las concentraciones mencionadas anteriormente indican las partes por millón del total de estos sólidos disueltos (ppm de TDS).

TABLA 2.3 Composición típica del agua de mar con una salinidad de 36,000 ppm  
[El-Dessouky y Ettouney, 2002]

Componente		% en masa	ppm
Cloruro	Cl <sup>-</sup>	55.03	19810.8
Sodio	Na <sup>+</sup>	30.61	11019.6
Sulfato	(SO <sub>4</sub> ) <sup>-</sup>	7.68	2764.8
Magnesio	Mg <sup>++</sup>	3.69	1328.4
Calcio	Ca <sup>++</sup>	1.16	417.6
Potasio	K <sup>+</sup>	1.16	417.6
Ácido carbónico	(CO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup>	0.41	147.6
Bromuro	Br <sup>-</sup>	0.19	68.4
Ácido bórico	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.07	25.2
<i>Total</i>		<i>100</i>	<i>36,000</i>

### 2.1.2 Sistemas de desalación

Las unidades empleadas para desalación se pueden dividir en dos grandes grupos: térmicas y de membrana. En las primeras, el procedimiento consiste en calentar el agua de alimentación para lograr su evaporación y luego obtener un condensado libre de sales (producto). En las segundas, se bombea agua a alta presión a través de membranas semipermeables que permiten el flujo de agua a través de ellas, pero no de sal. Las tecnologías más usadas actualmente son las siguientes:

- Sistemas térmicos
  - Destilación de múltiple efecto (MED)
  - Destilación instantánea de múltiple etapa (MSF)
  - Destilación por compresión de vapor (VC)
- Sistemas de membrana
  - Ósmosis Inversa (RO)
  - Electrodialisis (ED)

Las siglas, entre paréntesis, provienen del inglés.



Los sistemas térmicos de desalación producen agua de alta calidad, cuya concentración de sales disueltas varía entre 1 y 50 ppm, mientras que los sistemas de membrana producen agua con concentraciones que están entre 10 y 500 ppm. La cantidad de agua desalada en ambos sistemas es, generalmente, el 20% del agua de alimentación suministrada.

Independientemente del sistema empleado, el agua de alimentación debe ser previamente tratada. Los procesos de pre-tratamiento son indispensables para remover las sustancias que podrían interferir con el proceso de desalación; algas y bacterias pueden crecer tanto en sistemas de membranas como en sistemas de destilación, así que el uso de sustancias químicas, como cloro u ozono, es necesario en tal etapa. La luz ultravioleta también puede ser empleada para eliminar organismos marinos.

En plantas de ósmosis inversa, los sólidos suspendidos y otras partículas en el agua de alimentación deben ser removidos para disminuir el ensuciamiento de las membranas. La materia suspendida se puede eliminar mediante la adición de coagulantes y, después, mediante filtración. Los metales contenidos en el agua son expulsados en la salmuera; sin embargo, en algunas plantas de destilación es necesario remover con anterioridad tales componentes para evitar problemas de corrosión.

### 2.1.3 Capacidad instalada a nivel mundial

En la actualidad, la industria de la desalación está experimentando una rápida expansión en todo el mundo; las tecnologías más empleadas son la destilación instantánea de múltiple etapa y la ósmosis inversa. Antes de 2000, los procesos térmicos eran los más utilizados para desalación, pero ahora están siendo superados por los procesos de membrana, como se observa en la figura 2.2. En el año 2000 la producción mundial de agua a partir de la desalación fue de  $25.91 \times 10^6 \text{ m}^3$  por día.

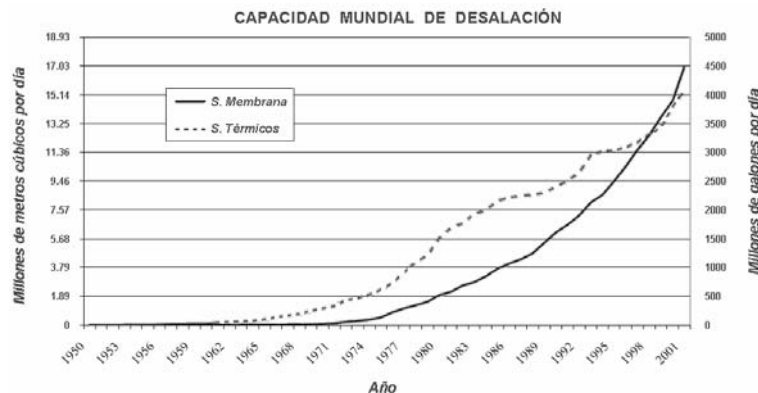


Figura 2.2 Tecnologías de desalación instaladas a nivel mundial [International Desalination Association, 2005]

En la tabla 2.4 se muestran los países con mayor capacidad instalada para desalación, el porcentaje relativo a la capacidad mundial y el tipo de tecnologías; todos estos datos referidos al año 2000. Se puede ver que varios países del Golfo Pérsico están incluidos en la lista, y que éstos son los que poseen más capacidad instalada con procesos térmicos.

TABLA 2.4 Capacidad instalada para desalación en algunos países en 2000  
[El-Dessouky y Ettouney, 2002]

País	Capacidad total [m3/día]	Porcentaje relativo a la producción mundial [%]	Tecnologías empleadas, %				
			MSF	MED	VC	RO	ED
Arabia Saudita	5,429,334	20.96	64.22	0.33	1.39	32.25	1.80
Estados U.	4,327,596	16.70	1.32	4.49	6.35	74.63	13.21
Emiratos A. U.	2,890,689	11.16	86.66	7.70	0.03	5.51	0.09
Kuwait	1,614,861	6.20	96.52	0.08	0.00	3.25	0.15
España	1,233,835	4.76	4.51	3.50	2.79	84.25	4.95
Japón	945,163	3.65	4.72	2.34	0.00	85.59	7.35
Libia	701,303	2.71	65.66	10.70	0.00	15.91	7.73
Italia	581,478	2.24	43.76	12.40	6.53	21.07	16.24

Además de estos países hay otros, como India, Egipto y China, que están incrementando su capacidad para desalación; mientras que otros, como Siria, Indonesia y Singapur, están apenas implementando estas tecnologías.

## 2.2 SISTEMAS TÉRMICOS DE DESALACIÓN

El objetivo principal de los sistemas térmicos de desalación es evaporar el agua de alimentación y obtener un destilado carente de sales. Sin embargo, calentar el agua hasta evaporarla requiere de gran cantidad de energía calorífica y, por lo tanto, de altos costos. Además, sustancias como carbonatos y sulfatos, encontradas en el agua de mar, pueden provocar incrustaciones al ser calentadas a temperaturas mayores a 95 °C, pues a esos niveles empiezan a despedir soluciones que se adhieren a los materiales; tales incrustaciones ocasionan problemas térmicos y mecánicos y, una vez formadas, son difíciles de remover.

Es por ello que en este tipo de equipos es necesario reducir la temperatura de ebullición del agua. Para lograrlo se recurre a sistemas de vacío, generalmente mediante eyectores, con los cuales se disminuye la presión en el interior de las cámaras de evaporación y, en consecuencia, el punto de ebullición del agua contenida. Las presiones de vacío en el sistema también contribuyen a la evaporación sucesiva del agua en distintas cámaras, con lo que se aprovecha al máximo la energía calorífica del agua ya calentada. El número de etapas necesarias dependerá del tipo de sistema empleado y del vacío logrado.

### 2.2.1 Destilación de múltiple efecto (MED)

En este sistema de desalación se emplea la energía proveniente de una fuente de calor (puede ser el vapor de extracción de una turbina o caldera) para calentar el agua de alimentación, que es posteriormente evaporada y condensada.

Para llevar a cabo tal procedimiento se recurre a una serie de cámaras, llamadas efectos, que se encuentran a presiones de vacío; el agua a desalar se hace pasar por el primer efecto, donde recibe energía calorífica de la fuente de calor y, en consecuencia, cierta cantidad se evapora, figura 2.3. El vapor así obtenido se lleva a un intercambiador de calor en la segunda cámara, que se encuentra a una presión más baja, donde cede energía hasta condensarse; de esta manera se obtiene el producto condensado y se sigue evaporando el agua de las cámaras subsecuentes. La reducción gradual de presión en los efectos permite que el agua pueda evaporar a temperaturas cada vez más bajas y que el vapor obtenido en cada cámara pueda ceder su energía en la siguiente.

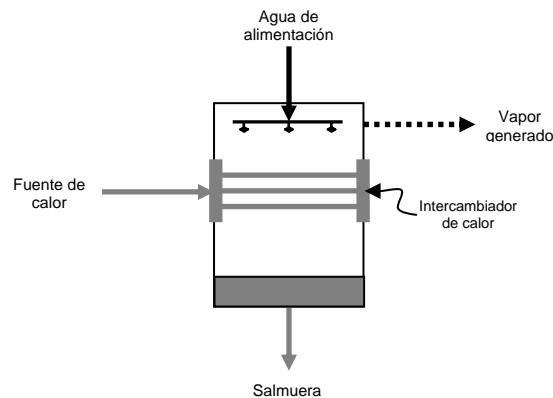


Figura 2.3 Cámara o "efecto" de un sistema MED  
[El autor]

El agua de alimentación es rociada dentro de la cámara por medio de un conjunto de aspersores; una vez que el vapor generado ha cedido su calor en el intercambiador y se ha condensado, éste se recolecta y se extrae como producto. Los actuales sistemas MED operan, comúnmente, a temperaturas máximas de 80 °C, y en plantas grandes se pueden emplear de 8 a 16 efectos, produciendo hasta 20,000 m<sup>3</sup>/día de agua desalada.

La salmuera resultante puede ser utilizada en el siguiente efecto o desechada, dependiendo de la configuración del sistema. Los posibles arreglos del sistema MED, de acuerdo a la forma en la que se suministra el agua de alimentación, son con alimentación en serie o en paralelo. A continuación se describe cada uno de ellos.

### 2.2.1.1 Alimentación en serie

En este caso, la salmuera desechada en el primer efecto es introducida en el segundo como agua de alimentación, donde aún se puede aprovechar su energía para continuar con la evaporación. La salmuera resultante en el segundo efecto se hace pasar al tercero y así sucesivamente. En la figura 2.4 se muestra esta configuración.

### 2.2.1.2 Alimentación en paralelo

En el caso anterior, la salmuera se hacía pasar por varias cámaras, donde incrementaba su concentración de sales; sin embargo, si la fuente de calor es tal que pueda evaporar una parte considerable del agua de alimentación y, por consiguiente, generar una salmuera muy concentrada, es conveniente desecharla; en estos casos la alimentación en paralelo resulta adecuada, figura 2.4.

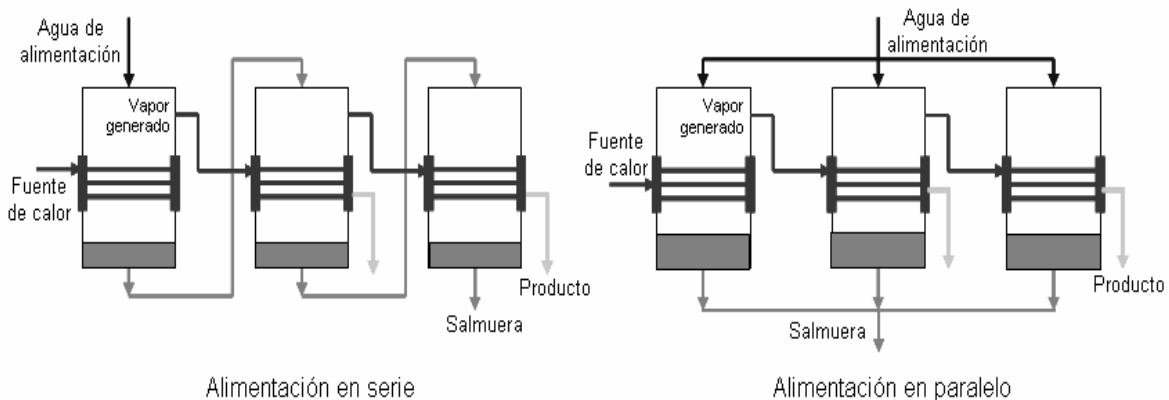


Figura 2.4 Sistemas MED con diferentes arreglos de alimentación  
[El autor]

### 2.2.2 Destilación instantánea de múltiple etapa (MSF)

El principal problema encontrado en el sistema MED es la formación de incrustaciones en los tubos de los intercambiadores, debido a la evaporación paulatina; sin embargo, al realizar una evaporación instantánea (evaporación tipo *flash*, del inglés) este problema se ve reducido; tal procedimiento es el principio de operación de los sistemas MSF.

En un sistema MSF el agua a desalar se hace pasar, primeramente, a través de una serie de intercambiadores de calor colocados dentro de las cámaras de evaporación; con esto se logra que el flujo de agua de alimentación se precaliente conforme avanza a través de las cámaras, debido a la condensación del vapor generado en etapas posteriores, figura 2.5.

Una vez precalentada el agua, ésta se extrae del sistema y se hace pasar a través de otro intercambiador, donde absorbe energía de una fuente externa (alguna extracción de vapor de una caldera o turbina), y después es introducida a la primera cámara de evaporación instantánea. En esta primera cámara, y como consecuencia de la presión vacuométrica dentro de ella, parte del agua se empieza a evaporar; el vapor generado, al ceder energía en los intercambiadores de precalentamiento, se condensa y es extraído como producto.

La salmuera remanente se hace pasar a las siguientes cámaras, con presiones cada vez menores, donde se lleva a cabo el mismo procedimiento. Finalmente se colecta el destilado de cada cámara y se desecha la salmuera obtenida en la última etapa.

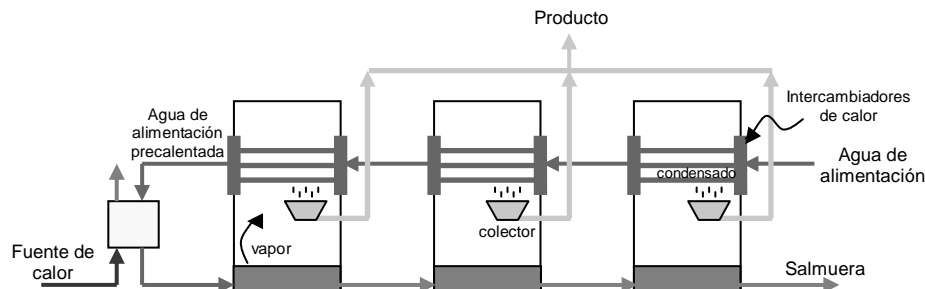


Figura 2.5 Sistema de desalación MSF  
[El autor]

La temperatura del agua, después de haber sido calentada con la fuente de calor externa, varía entre los 90 y los 120 °C, generalmente. A mayores temperaturas la eficiencia del sistema se incrementa, pero la formación de incrustaciones también es mayor. El número de cámaras empleadas en estas plantas puede variar entre 4 y 40, con una capacidad de más de 50,000 m<sup>3</sup>/día.

### 2.2.3 Destilación por compresión de vapor (VC)

En este proceso, el agua de alimentación es precalentada en un intercambiador de calor con la energía residual del agua ya desalada y de la salmuera, figura 2.6. El agua a desalar es posteriormente introducida en una cámara de evaporación, a presión de vacío, donde absorbe energía en forma de calor hasta evaporarse; el vapor generado es después comprimido y, en consecuencia, incrementa su temperatura. Una vez comprimido el vapor, éste se hace pasar a través de un intercambiador de calor, donde cede energía al agua de alimentación que está por evaporarse; al ceder energía, el vapor se condensa y puede ser extraído como producto. Finalmente, el condensado obtenido y el agua no evaporada (salmuera) se envían al intercambiador de precalentamiento.

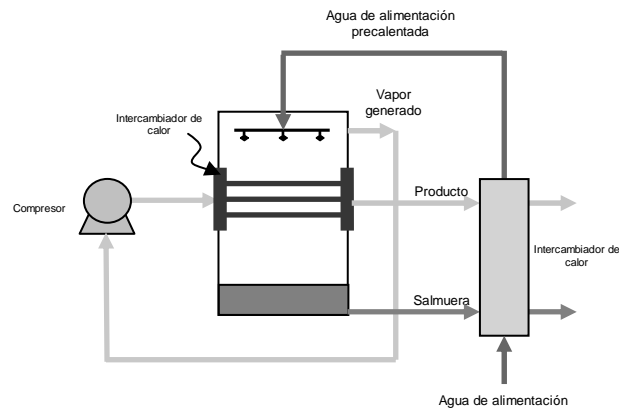


Figura 2.6 Destilación por compresión de vapor  
[El autor]

Para comprimir el vapor generado en estos sistemas pueden emplearse dos tipos de equipos, un compresor mecánico o uno térmico (eyector). Tanto el primero, que requiere energía eléctrica para operar, como el segundo pueden crear también el vacío necesario para la evaporación.

Los procesos de desalación por compresión de vapor son particularmente empleados en plantas de pequeña y mediana capacidad. Las unidades con compresores mecánicos pueden lograr producciones de 3,000 m<sup>3</sup> por día, mientras que las unidades con termocompresores alcanzan hasta 20,000 m<sup>3</sup>/día.

## 2.3 SISTEMAS DE DESALACIÓN CON MEMBRANAS

### 2.3.1 Ósmosis inversa (RO)

En este proceso el agua de alimentación, después de haber pasado por la etapa de pretratamiento, es presurizada por medio de una bomba y después llevada a un arreglo de membranas que separan el agua de las sales disueltas en ella. El agua separada, o permeado, es posteriormente conducido a una etapa de postratamiento, de donde finalmente se extrae el producto, figura 2.7.

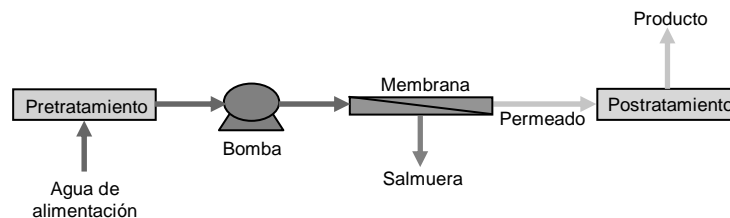


Figura 2.7 Proceso de desalación mediante ósmosis inversa  
[El autor]

La energía requerida en estos sistemas es la consumida por la bomba al presurizar el fluido; la presión aplicada debe ser mayor a la presión osmótica<sup>4</sup> del agua salada, por ejemplo, la presión necesaria para desalar agua salobre va de los 17 a los 27 bar, y para agua de mar se requieren de 54 a 84 bar. La cantidad de producto obtenido en los sistemas de ósmosis inversa varía entre el 30 y el 80% del agua total suministrada, dependiendo de la concentración salina del agua. Con este tipo de unidades se pueden producir más de 50,000 m<sup>3</sup>/día de agua desalada, semejantes en capacidad a los sistemas MSF.

### 2.3.2 Electrodialisis (ED)

En este proceso, el agua de alimentación es introducida en una serie de canales paralelos, los cuales se encuentran separados por membranas alternadas que permiten el paso de sólo iones positivos o sólo iones negativos, figura 2.8. A ambos lados del arreglo se aplica una diferencia de potencial, lo cual provoca que los aniones de la solución migren hacia el polo positivo y los cationes hacia el negativo. Los aniones atraviesan la membrana que permite su paso, pero se detienen en la siguiente, donde son retenidos y se empiezan a concentrar. De la misma manera, los cationes atraviesan la membrana que permite su flujo, pero son atrapados en la siguiente membrana; con esto se logra que haya canales con alta concentración de iones y otros con baja concentración.

El agua contenida en los espacios de baja concentración es colectada y extraída como producto, mientras que el agua de los demás canales se extrae como salmuera. Una unidad de electrodialisis se forma con cientos de celdas (arreglo canal-membranas), y puede llegar a producir hasta 30,000 m<sup>3</sup> por día. Puesto que el medio para la separación es un campo eléctrico, con la electrodialisis sólo se pueden remover los componentes iónicos de la solución.

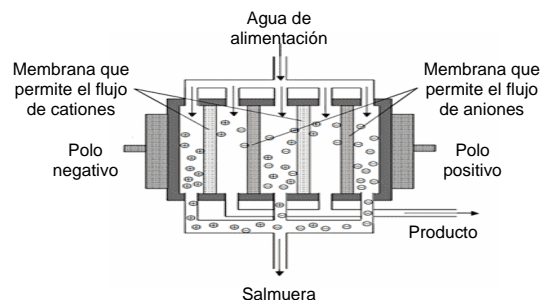


Figura 2.8 Proceso de desalación mediante electrodialisis  
[Sandia National Laboratories, 2003]

<sup>4</sup> Presión osmótica: presión mínima necesaria que permite el paso de las moléculas del disolvente puro desde una disolución a través de una membrana semipermeable.

### 2.3.3 Tabla comparativa de los diferentes sistemas de desalación

El consumo energético, la capacidad de producción, la calidad del agua generada y otros aspectos importantes de cada uno de los sistemas vistos anteriormente (térmicos y de membrana) se muestran en la figura 2.9. Los precios mencionados hacen referencia a los costos de producción en 2002.

<i>Característica</i>	<i>MSF</i>	<i>MED-TVC</i>	<i>CV</i>	<i>OI</i>	<i>ED</i>
Tipo de energía	Térmica	Térmica	Eléctrica	Eléctrica	Eléctrica
Consumo energético primario (KJ/kg)	Alto>200	Alto/medio150-200	Medio100-150	Bajo< 80	Bajo<30
Consumo de energía eléctrica kWh/m <sup>3</sup>	3.5-4.0	1.5-2.0	9.0-11.0	2.4 – 4.5	1-2
Costo de instalaciones	Alta	Alto/medio	Alto	Medio	Medio
Capacidad producción m <sup>3</sup> /d	Alta>50,000	Media<20,000	Baja <5,000	Alta>50,000	Media<30,000
Posibilidad ampliación	Difícil	Difícil	Difícil	Fácil	Fácil
Desalación agua de mar	Si	Si	Si	Si	No
Calidad agua desalada ppm	Alta< 50	Alta<50	Alta<50	Media300-500	Media<300
Superficie terreno requerida de instalación	Mucha	Media	Poca	Poca	Poca
Costo USD/m <sup>3</sup> tratado	1.14-1.68	0.83-1.115	0.63-0.86	0.32-0.61	0.17-0.32 <sup>1</sup>
Costo USD/m <sup>3</sup> plantas pequeñas		1.28-2.16		1.1-1.8	
<sup>1</sup> Agua salobre					

Figura 2.9 Comparación de las diferentes alternativas comerciales de desalación  
[Fuentes y Ramírez, 2001]

El tipo de tecnología a utilizar para los proyectos de desalación depende de aspectos como la calidad del agua requerida, el tipo de agua a desalar, el tipo de energía disponible, etc. Como se muestra en la figura anterior, cada uno de los sistemas presenta sus ventajas e inconvenientes, es por ello que la elección del proceso que se quiera implementar en un proyecto debe ser analizada para cada caso particular. Actualmente, los procesos de ósmosis inversa son los que están ganando amplia aceptación y el desarrollo de tal tecnología ha reducido significativamente los costos de desalación.

### 2.4 TECNOLOGÍAS DE DESALACIÓN INSTALADAS EN MÉXICO

El proceso de desalación más utilizado en México es la ósmosis inversa, seguido por la compresión de vapor y los sistemas solares de desalación, que emplean directamente la radiación solar para evaporar el agua. Además, en Baja California Sur se tiene instalada una planta experimental de ósmosis inversa acoplada a un sistema solar de generación eléctrica. El 53% de las plantas instaladas en el país son para uso turístico, con una capacidad instalada de 26,942 m<sup>3</sup>/día; el 35% son destinadas a usos municipales, con una capacidad de 18,403 m<sup>3</sup>/día; y el 12% son para uso industrial, con una producción de 22,143 m<sup>3</sup>/día. En las figuras 2.10 y 2.11 se muestra la capacidad instalada para desalación por estado y el tipo de unidades instaladas, respectivamente.



Estado	Plantas desaladoras	% Nacional	Opera		Capacidad instalada	Capacidad que opera
			Sí	No	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /d
Baja California	10	5.8%	7	3	9,540	8,040
Baja California Sur	38	22.2%	32	6	8,979	3,346
Campeche	2	1.2%	2	0	3,120	2,132
Coahuila	7	4.1%	2	5	78	31
Durango	24	14.0%	9	15	650	374
Guerrero	4	2.3%	2	2	2,000	900
Nuevo León	2	1.2%	2	0	325	325
Oaxaca	1	0.6%	1	0	13,478	13,478
Q. Roo	76	44.4%	57	19	27,058	23,266
SLP	1	0.6%	1	0	60	5
Sonora	5	2.9%	4	1	471	80
Tamaulipas	1	0.6%	1	0	1,728	363
<b>Total nacional</b>	<b>171</b>	<b>100%</b>	<b>118</b>	<b>53</b>	<b>67,487</b>	<b>52,340</b>

Figura 2.10 Capacidad instalada para desalación en México  
[Fuentes y Ramírez, 2001]

Estado	Plantas desaladoras	Proceso				SolarExperimental
		OI	CV	MSF	Solar	
Baja California	10	3	4	1	2	0
Baja California Sur	38	32	3	0	2	1
Campeche	2	2	0	0	0	0
Coahuila	7	7	0	0	0	0
Durango	24	24	0	0	0	0
Guerrero	4	4	0	0	0	0
Nuevo León	2	2	0	0	0	0
Oaxaca	1	1	0	0	0	0
Q. Roo	76	75	1	0	0	0
San Luis Potosí	1	1	0	0	0	0
Sonora	5	4	0	0	1	0
Tamaulipas	1	1	0	0	0	0
<b>Total Nacional</b>	<b>171</b>	<b>156</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>1</b>

Figura 2.11 Tipos de desaladoras instaladas en México  
[Fuentes y Ramírez, 2001]

Al observar el incremento en capacidad de los sistemas de desalación en México y a nivel mundial, resulta evidente afirmar que la desalación del agua de mar se está convirtiendo en una muy buena opción para combatir la escasez de agua, puesto que las fuentes de agua salada son muy accesibles y los costos de producción de agua potable mediante desalación están siendo cada vez más bajos; además de que en plantas de generación eléctrica, por ejemplo, pueden implementarse los sistemas de desalación para cogeneración y aprovechar la energía que, de otra manera, se desperdiciaría. Uno de los objetivos del presente trabajo es, precisamente, aprovechar la energía térmica residual de un proceso de generación eléctrica en la desalación de agua de mar.

## **CAPÍTULO 3. SITUACIÓN ENERGÉTICA Y DE AGUA EN MÉXICO**

Uno de los problemas que enfrenta México actualmente es la carencia de energía eléctrica en varias regiones del país, muchas de las cuales se localizan en el norte del territorio nacional, como en la península de Baja California. Aunado a ello, en esa misma zona, la disponibilidad de agua potable puede llegar a ser incluso 15 veces menor que en el sur. Coincidentemente es en estos lugares donde se han detectado zonas con características geotérmicas que, aunque la mayoría no sea de alta entalpía, bien podrían ser aprovechadas para dar solución a uno o ambos problemas.

En el presente capítulo se describirá un panorama muy general de la energía eléctrica y la distribución del agua en México, para después señalar algunas de las zonas en las que se han localizado fuentes geotermales; varias de las cuales han sido estudiadas por el equipo de investigación IMPULSA (Investigación Multidisciplinaria de Proyectos Universitarios de Liderazgo y Superación Académica) del Instituto de Ingeniería de la UNAM, del cual el autor forma parte.

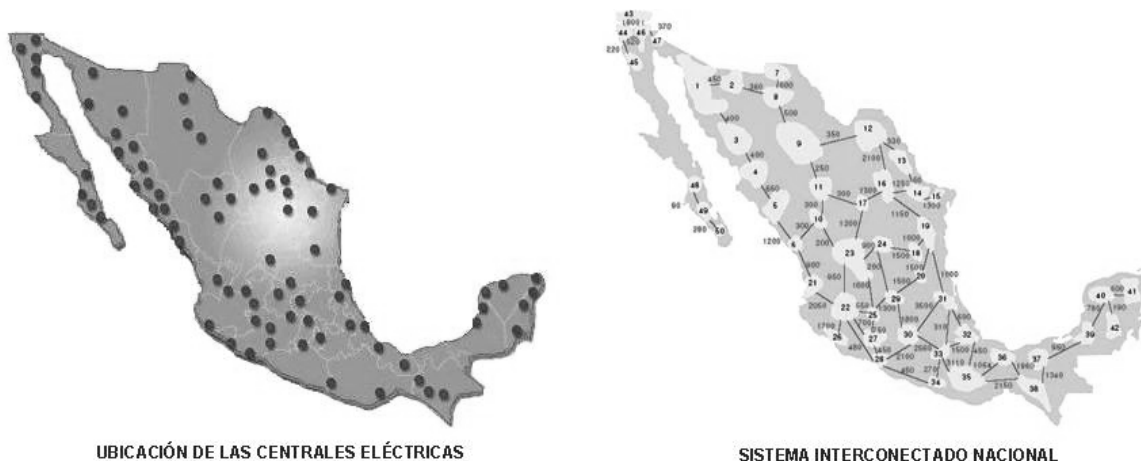
Con la información presentada, se podrá observar que en muchas de las regiones estudiadas sería muy conveniente la instalación de sistemas eléctricos que aprovechen los recursos geotérmicos encontrados, para proveer de electricidad y agua a las comunidades que lo necesiten.

### *3.1 LA DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO*

En la actualidad, México cuenta con 177 centrales generadoras que proporcionan una capacidad eléctrica total de 49,861 MW, incluyendo la capacidad instalada por la CFE y la de productores independientes. La red de transmisión eléctrica está compuesta por 48,527 km de líneas de 400, 230 y 161 kV; y 47,534 km de líneas de subtransmisión de 138 kV y tensiones menores.

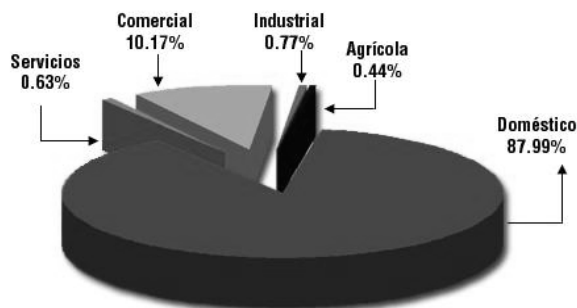
Más de 128,446 localidades cuentan con electricidad, de las cuales 125,053 son rurales y 3,393 urbanas. Sin embargo, aunque el servicio de energía eléctrica llega al 97% de la población, aún quedan por electrificar 70,945 comunidades. Clasificadas por su nivel de población, son 2,512 localidades de cien a 2,499 habitantes y 68,433 localidades con una población menor a cien habitantes.

En la figura 3.1 se puede observar el sistema interconectado nacional. Nótese que en una gran porción de la península de Baja California no se cuenta red eléctrica.



*Figura 3.1 Centrales generadoras de México y el sistema interconectado nacional*  
 [Comisión Federal de Electricidad, 2007]

Con la capacidad instalada, se proporciona servicio de energía eléctrica a casi 80 millones de mexicanos; el 87.99% de los cuales representa el sector cuyo consumo de electricidad es para uso doméstico, como se observa en la figura 3.2.



*Figura 3.2 Usuarios de energía eléctrica por sector*  
 [Comisión Federal de Electricidad, 2007]

De la capacidad total instalada, el 44.82% corresponde a generación termoeléctrica de la CFE; 22.98% a productores independientes de energía; 22.15% a hidroelectricidad; 5.21% a centrales carboeléctricas; 1.92% a geotérmica; 2.74% a nucleoelectrica, y 0.17% a eoloelectrica.

### 3.2 LA DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

El 52% de la superficie de México es árida y semiárida, 13% es trópico seco, 20% es templado y 15% trópico húmedo; debido a esto el país presenta un marcado contraste territorial de escasez y abundancia de agua.

El territorio nacional recibe en promedio 772 mm de lluvia al año, lo que equivale a 1,519 km<sup>3</sup> anuales, y de dicho porcentaje, 73% se evapora (1,109 km<sup>3</sup>), en tanto que el resto escurre por ríos, arroyos o va a la recarga de mantos acuíferos. Así, a cada mexicano le corresponden en promedio alrededor de 4,841 m<sup>3</sup> de agua al año, de acuerdo con los datos de la Comisión Nacional de Agua (CNA). No obstante, las lluvias se presentan mayoritariamente en cuatro meses del año (de junio a septiembre cae el 67% del total), además de que su distribución es muy distinta: en el noreste, norte y centro del país se genera el 32% del escurrimiento, en tanto que en el sureste se genera el 68%.

Además, en el noreste, norte y centro del país, donde hay escasez relativa de agua, reside el 77% de la población y se genera el 86% del producto interno bruto (PIB), mientras que en el resto del territorio, donde existe la mayor disponibilidad de agua, habita el 23% de la población y se genera el 14% del PIB, figura 3.3. A la diferenciación espacial y temporal del recurso agua se agrega también la desigualdad en el acceso, la cual obedece principalmente a razones sociales y económicas.

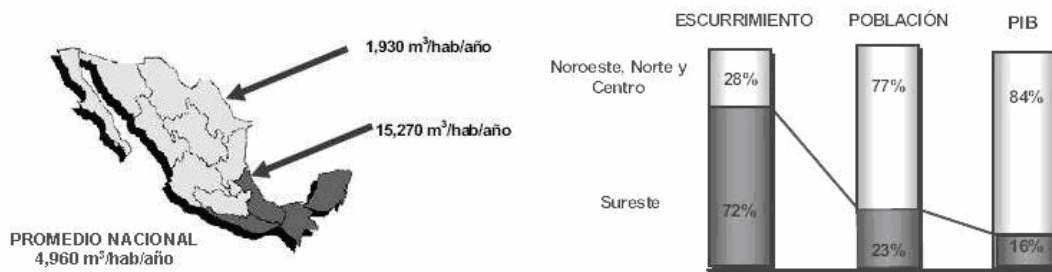


Figura 3.3 Contraste entre el desarrollo y la disponibilidad del agua  
[Comisión Nacional de Agua, 2001]

La principal fuente de suministro del agua en México está conformada por los mantos acuíferos subterráneos; se han identificado cerca de 653 cuerpos de agua subterránea distribuidos en todo el territorio nacional, de los cuales sólo el 14.7% (96 cuerpos) suministran el 50% del agua empleada en toda la nación. Lo anterior provoca que haya problemas de sobreexplotación en los acuíferos y que la reserva de agua subterránea esté disminuyendo a un ritmo cercano a los 8 km<sup>3</sup>/año. La sobreexplotación ha provocado intrusión salina en 17 acuíferos ubicados en los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nuevo León, Coahuila, Colima y Veracruz.

La situación de escasez en muchas regiones del país se agrava por la contaminación del agua, y en zonas de aparente abundancia, la disponibilidad efectiva se reduce por la misma razón.

En promedio, México dispone de aproximadamente 4,841 m<sup>3</sup>/persona por año, sin embargo, mientras una persona de Chiapas dispone de cerca de 15,000 m<sup>3</sup> al año, una de Baja California dispone de menos de 1,000. Por ello, puede resultar muy conveniente emplear la desalación del agua de mar como alternativa a los problemas de mala distribución y contaminación del agua en el país.

### *3.3 LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS DE MÉXICO*

México es un país con gran variedad de recursos geotérmicos, incluyendo yacimientos de alta y baja entalpía, distribuidos en todo el territorio. La explotación de los yacimientos geotérmicos de alta entalpía se ha llevado a cabo de manera exitosa en nuestro país desde 1973, contando actualmente con 4 centrales geotermoeléctricas que producen 953 MW. Sin embargo, la explotación de los recursos de baja entalpía, que también representa un importante potencial, no se ha desarrollado de la misma manera debido, entre otras cosas, a las siguientes razones:

- Las zonas con recursos geotérmicos de baja entalpía, generalmente, no presentan manifestaciones superficiales que ayuden a identificar su existencia y estimar su potencial.
- La energía almacenada en el reservorio de baja entalpía es menor que la encontrada en los yacimientos de alta entalpía; y por lo tanto, la energía eléctrica que se podría generar estaría limitada a unos cuantos kW, cuya contribución al sistema eléctrico nacional sería insignificante.
- Debido a la cantidad de energía almacenada en el reservorio de baja temperatura, es necesario aplicar tecnologías más sofisticadas que ayuden en la producción de generación eléctrica.
- La mayoría de los sitios geotérmicos se encuentran alejados de los grandes asentamientos urbanos.

En consecuencia, los recursos de entalpías bajas podrían ser aprovechados y adecuados en la instalación de pequeñas plantas independientes, con capacidades de entre 200 y 800 kW, cuya energía pueda ser consumida en pequeñas comunidades cercanas al reservorio geotérmico. Además de que la energía calorífica remanente se podría aprovechar para desalar el agua de mar que, en un principio, puede ser empleada en el enfriamiento de la planta eléctrica.

Actualmente en México se tienen identificados más de 30 sitios que presentan manifestaciones geotérmicas de baja entalpía, la mayoría localizada a lo largo de la costa del Pacífico en la península de Baja California y en la parte noroeste del país, como se observa en la figura 3.4.



Figura 3.4 Zonas con manifestaciones geotérmicas [Hiriart, 1999]

Superponiendo esta imagen con la de la red eléctrica nacional, es posible identificar los lugares en los que sería conveniente desarrollar un programa geotérmico de electrificación rural. Los sitios más atractivos se localizan en el norte de Baja California Sur, en Chihuahua y en Sonora, donde la escasez de agua también es notable.

En Baja California Sur hay varias playas al sur de Mulege, por ejemplo Santispac, donde el turismo nacional e internacional disfruta de las cálidas aguas, la fina arena de la playa y la hermosa vista del mar. En esta área no hay electricidad, y los turistas emplean en ocasiones módulos solares para proveerla. La línea de transmisión más cercana llega hasta Mulege, situado a 40 km de Santispac, y actualmente no se tiene planeado ningún proyecto de construir otra línea que llegue al sitio. Un programa geotermoeléctrico en esta zona beneficiaría a las localidades cercanas y podría desarrollar nuevas fuentes de empleo al aprovechar la energía eléctrica para ofrecer más servicios al turismo.

Los recursos geotérmicos de Santispac son, principalmente, aguas termales que alcanzan 60 °C al lado de la playa; este fenómeno, como el de otros sitios de Baja California, se debe a la actividad tectónica existente en la península. En la figura 3.5 se muestra el modelo conceptual de la actividad geotérmica en el lugar.

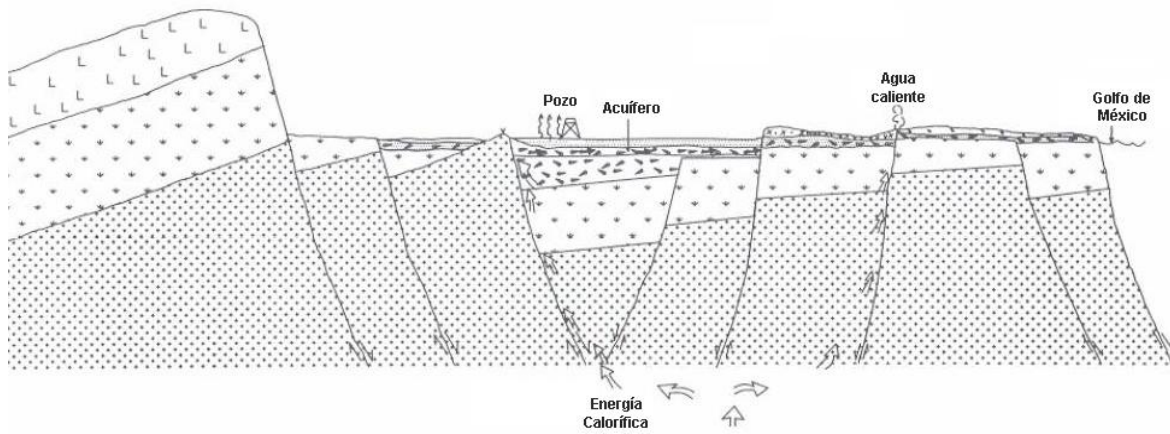


Figura 3.5 Modelo conceptual del fenómeno geotérmico en Santispac [Hiriart, 1999]

Además de este lugar, se han localizado varios puntos de interés a lo largo de la península de Baja California, como en Los Cabos<sup>5</sup>, La Paz, Puertecitos, San Felipe, Punta Banda, entre otros (figura 3.6), donde también se ha observado actividad geotérmica. En varios de estos sitios no se cuenta con agua potable ni electricidad.



Figura 3.6 Recursos geotérmicos en la península de Baja California [IMPULSA, 2006]

<sup>5</sup> López Sánchez, A, Bâncora Alsina, C, Prol Ledesma, RM, Hiriart, G (2006), A New Geothermal Resource in Los Cabos, Baja California Sur, Mexico, 2006.

En Los Cabos, al perforar uno de los pozos playeros para alimentar una desaladora de ósmosis inversa, se encontraron temperaturas del agua de hasta 84 °C a sólo seis metros de profundidad. En las playas de Punta Banda hay manantiales con agua salobre de hasta 50 °C en la superficie; asimismo, en la parte norte del poblado de San Felipe y en algunas playas al sur del mismo poblado, como en Puertecitos, se han encontrado fuentes termales dentro del mar que no están muy alejadas de la costa.

Actualmente el equipo IMPULSA realiza prospecciones geofísicas<sup>6</sup> de los lugares donde existen manantiales calientes en la península de Baja California, observando en particular la geoquímica del agua caliente y la presencia de gases disueltos; con lo cual se pretende caracterizar cada una de las zonas.

### 3.3.1 Estudio de los recursos geotérmicos de Baja California

En el estudio hecho por el equipo IMPULSA, para lograr la caracterización de las zonas en las que se detectaron manifestaciones geotérmicas, la península de Baja California se dividió en tres áreas de interés: Punta Banda, Bahía Concepción y Los Cabos, figura 3.7.

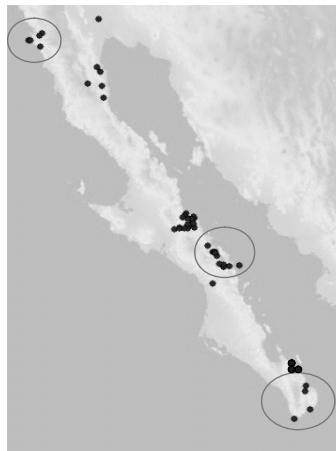


Figura 3.7 Zonas de estudio de manantiales y pozos geotérmicos  
[IMPULSA, 2006]

- Zona de Los Cabos

En este sitio se analizaron cinco puntos donde se registra actividad geotérmica, cuatro de ellos se ubican en el área denominada Desaladora y el otro en Punta Gorda, figura 3.8. Tales lugares están situados sobre la falla conocida como “El Cardonal”.

---

<sup>6</sup> Prospección geofísica: conjunto de métodos físicos y matemáticos, aplicados a la exploración del subsuelo, para la búsqueda y análisis de yacimientos de sustancias útiles, por medio de observaciones efectuadas en la superficie de la corteza terrestre.





Figura 3.8 Zona de Los Cabos (izquierda) y puntos de la zona “Desaladora” (derecha) [IMPULSA, 2006]

Las principales características de los puntos localizados en el área “Desaladora” se muestran en la tabla 3.1. Las primeras tres medidas fueron tomadas a una profundidad de 6 metros, la cuarta a una profundidad de 25 metros. En la figura 3.9 se muestra el momento en el que miembros del equipo tomaron la temperatura en uno de los puntos (del cual se iba proveer agua a la planta de ósmosis inversa instalada en la zona).

TABLA 3.1 Puntos localizados en la zona “Desaladora”, en Baja California Sur [Prol Ledesma et al., 2004]

Punto	Localización	Temperatura (°C)	pH	TDS (ppm)
1	N 22° 52.723' / W 109° 58.567'	42.5	5.6	16,530
2	N 22° 52.872' / W 109° 58.828'	72.1	5.7	31,000
3	N 22° 52.905' / W 109° 58.863'	78.5	6.45	28,600
4	N 22° 52.822' / W 109° 58.717'	71.3	6.75	15,200



Figura 3.9 Toma de temperaturas en Los Cabos, Baja California Sur [IMPULSA, 2006]

En estos puntos se midieron las concentraciones de las sustancias presentes, y con la ayuda de geotermómetros<sup>7</sup>, se pronosticaron las temperaturas que podría tener el

<sup>7</sup> Geotermómetro: modelo matemático que, basado en la composición química de los fluidos geotérmicos, permite estimar la temperatura del yacimiento geotérmico.

reservorio geotérmico; los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.2. El modelo conceptual del fenómeno en este lugar, y en las otras dos zonas de estudio, es el mostrado en la figura 3.5.

TABLA 3.2 Posibles temperaturas del reservorio geotérmico en Los Cabos  
[López, A, Báncora, C, Prol, RM, Hiriart, G, 2006]

Punto	Temperatura Pronosticada (°C)
1	170.6
2	192.8
3	149.0
4	121.8

- Zona de Bahía Concepción

En esta zona, situada en la parte media de la península de Baja California y del lado del golfo (figura 3.10), se detectaron manifestaciones hidrotermales costeras y submarinas. El agua geotérmica es del tipo sódico-clorurada, con temperaturas de 72 a 87 °C. La temperatura del reservorio pronosticada fue de 211 °C. El fluido geotérmico descargado es una mezcla del agua de mar con agua meteórica (agua de lluvia infiltrada) y agua connata (agua atrapada en los sedimentos).



Figura 3.10 Zona de Bahía Concepción  
[IMPULSA, 2006]

- Zona de Punta Banda

Los estudios realizados indican que el fluido del sistema hidrotermal de Punta Banda tiene una componente de agua meteórica de aproximadamente 50% y el mismo porcentaje de agua de mar. El agua geotérmica es del tipo sódico-clorurada, con manifestaciones costeras y submarinas. La temperatura medida varía entre 102 y 108 °C, y se calcula que la temperatura en el reservorio sea de aproximadamente 206 °C. En la figura 3.11 se muestra la ubicación de tal zona.

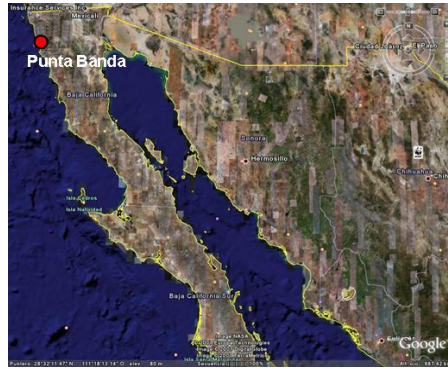


Figura 3.11 Zona de Punta Banda  
[IMPULSA, 2006]

- Otras zonas

Del resto de los sitios estudiados en la península se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.3; las temperaturas y demás datos fueron tomados en la superficie. En estos lugares aún no se llevan a cabo las prospecciones geofísicas. La ubicación de estos sitios se muestra en la figura 3.8.

TABLA 3.3 Características de varios sitios con actividad geotérmica en Baja California  
[IMPULSA, 2006]

SITIO	Longitud	Latitud	Temp. (°C)	pH	TDS (gramos/litro)
Ejido Uruapan 1	N 31°37' 57.1"	W 116°26' 3.8"	45.5	9.39	0.51
Ejido Uruapan 2	N 31°37' 57.4"	W 116°26' 3.5"	42.3	9.43	0.514
San Carlos	N 31°47' 43.1"	W 116°26' 36.9"	45.2	8.52	0.372
San Felipe	N 31°1' 31.7"	W 114°49' 47.3"	43.4	-	6.24
Puertecitos 1	N 30°20' 45.9"	W 114°38' 9.7"	53.8	6.77	23
Puertecitos 2	N 30°20' 45.9"	W 114°38' 9.7"	51.2	6.52	27.2

Además de los datos mostrados, también se midieron las concentraciones de las sales disueltas en el agua geotérmica y su tipo, encontrándose elementos como calcio, magnesio, potasio, sodio, bario, cloruros, sulfatos, entre otros. Asimismo, se tomaron medidas de las propiedades eléctricas del fluido para determinar la localización de los posibles reservorios geotérmicos.

Como puede observarse, la península de Baja California y muchos otros lugares del norte de México son sitios apropiados para la instalación de sistemas geotérmicos que provean de electricidad, agua, o ambos servicios. La capacidad del sistema dependerá de las características particulares de la zona y de las necesidades en la región.

## **CAPÍTULO 4. PROPUESTAS PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA CON RECURSOS GEOTÉRMICOS DE BAJA ENTALPÍA**

En el presente trabajo de tesis, se propone el aprovechamiento de los recursos geotérmicos de baja entalpía, encontrados en varias zonas de la República Mexicana, como fuente de energía para un sistema autónomo de generación eléctrica. De la misma manera, se estudia el posible aprovechamiento de la energía remanente en el fluido geotérmico para la desalación de agua de mar, mediante sistemas térmicos de desalación.

En el caso de la generación eléctrica se analizan tres sistemas, uno de los cuales es el ciclo binario empleado en las plantas geotermoeléctricas, y los otros dos son ciclos binarios modificados, en los cuales se propone sustituir el evaporador por uno o dos sistemas de evaporación tipo *flash*; con ello se busca incrementar la potencia neta de la planta geotermoeléctrica, disminuir el espacio necesario para su instalación y hacer más sencillo su mantenimiento.

Los análisis hechos servirán para determinar la potencia eléctrica generada con cada sistema y definir las características óptimas para su operación. Con los resultados obtenidos se podrá finalmente decidir sobre la conveniencia de las propuestas y elegir la mejor opción.

### **4.1 CONSIDERACIONES**

- Sobre el recurso geotérmico

Se simulará el uso de un recurso geotérmico en el que la profundidad del acuífero no sobrepase los 1000 m, y cuya temperatura sea mayor a 130 °C, pues en este tipo de yacimientos se pueden perforar pozos delgados de bajo costo.

- Sobre la planta

Los recursos geotérmicos disponibles en las zonas de estudio son de baja entalpía, en consecuencia, se emplearán sistemas binarios de generación eléctrica para el presente análisis. Tales sistemas, además de trabajar a temperaturas bajas, ofrecen las ventajas de confinar los problemas de corrosión, erosión e incrustación al intercambiador de calor, con lo cual se evita el deterioro de otras partes de la planta, como la turbina, por ejemplo.

La planta eléctrica será diseñada para trabajar con un recurso geotérmico que se encuentre en estado líquido, por lo tanto, si el fluido se encuentra a temperaturas en las cuales pueda evaporar, será necesario el uso de una bomba que lo presurice y evite su evaporación.

El fluido de trabajo a utilizar será agua desmineralizada, debido a que el manejo de fluidos orgánicos es complicado y requiere de personal especializado; además de que las pérdidas por fugas de tales fluidos (7% por año, aproximadamente) incrementan de manera significativa los costos.

Para el arranque de la planta eléctrica se puede considerar el uso de baterías, pues su adquisición es más económica que la de un generador diesel.

#### 4.2 CÁLCULO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL RECURSO GEOTÉRMICO

Para estimar el potencial energético de un yacimiento geotérmico del que aún se conoce poco, se puede recurrir a un método de evaluación preliminar conocido como modelo volumétrico, en el que se calcula la masa del líquido caliente contenida en el yacimiento y la energía almacenada en él.

Con estos valores, y conociendo la proporción aproximada del fluido empleado en superficie, es posible determinar la capacidad eléctrica a instalar. Cabe aclarar que este cálculo es aproximado, y que el modelo final del yacimiento se podrá hacer cuando ya se tenga información real recabada en los pozos exploratorios.

Lo primero que se hará para estimar el potencial energético del yacimiento, con base en el modelo volumétrico, será calcular la energía que cede el reservorio al disminuir en  $\Delta T$  °C su temperatura, lo cual se puede lograr mediante el siguiente balance de energía:

$$E_{cedida} = V_{yac} (1 - \phi) \rho_r C_{p_r} \Delta T + V_{yac} (\phi) \rho_f C_{p_f} \Delta T \quad [4.1]$$

Donde  $V_{yac}$  es el volumen del yacimiento,  $\phi$  representa la porosidad de las rocas (espacio ocupado por el agua geotérmica);  $\rho_r$  y  $C_{p_r}$ , y  $\rho_f$  y  $C_{p_f}$  representan la densidad y capacidad calorífica de las rocas y del fluido, respectivamente; y  $\Delta T$  es el decremento de temperatura en el volumen de yacimiento estudiado.

En este caso, el tipo de sedimentos profundos encontrados en la península de Baja California son en su mayoría areniscas (a lo largo de la costa del Océano Pacífico y en el sur de la península); y rocas ígneas extrusivas ácidas (riolitas) y básicas (basaltos), en menor cantidad<sup>8</sup>. Considerando que el yacimiento está constituido principalmente por areniscas, y que el reservorio, a las profundidades de interés, se encuentra a una temperatura promedio de 160 °C, se tiene que:

---

<sup>8</sup> INEGI, 2007.

$$\phi = 15\%$$

$$\rho_r = 2300[\text{kg} / \text{m}^3]$$

$$C_{pr} = 0.96[\text{kJ} / \text{kgK}]$$

$$\rho_f = 909[\text{kg} / \text{m}^3]$$

$$C_{pf} = 4.3[\text{kJ} / \text{kgK}]$$

Sustituyendo los datos anteriores en la ecuación 4.1, para 1 m<sup>3</sup> de yacimiento y un decremento de 1 °C en su temperatura, se obtiene una energía total cedida de:

$$E_{cedida} = 2463.1[\text{kJ} / \text{m}^3\text{°C}]$$

En cuanto a un ciclo binario, como es nuestro caso, la energía calorífica aprovechada en superficie es aproximadamente el 40% de la disponible en el fluido geotérmico, y de ésta, alrededor del 10% es transformada en electricidad; por lo tanto, la energía eléctrica producida será solamente el 4% de la energía cedida por el yacimiento. Considerando lo anterior, y que el decremento total de temperatura en el yacimiento sea de 10 °C, se tiene:

$$E_{electrica} = 2463.1[\text{kJ} / \text{m}^3\text{°C}] \times (0.04) \times (10[\text{°C}])$$

$$E_{electrica} = 985.24[\text{kJ} / \text{m}^3]$$

Ahora, suponiendo un volumen de yacimiento pequeño, de 2 km<sup>2</sup> de área y 400 m de espesor, se puede calcular la capacidad eléctrica a instalar. Hay que tomar en cuenta la vida útil del proyecto, que en plantas de este tipo puede ser de 20 años. Sabiendo que en 20 años hay 630.72 × 10<sup>6</sup> [s], y que el volumen de yacimiento a utilizar es, por lo tanto, de 800 × 10<sup>6</sup> [m<sup>3</sup>]; se llega a lo siguiente:

$$Pot_{electrica} = \frac{985.24[\text{kJ} / \text{m}^3] \times (800 \times 10^6[\text{m}^3])}{630.72 \times 10^6[\text{s}]}$$

$$Pot_{electrica} = 1250[\text{kW}]$$

Lo que señala, en primera instancia, que un reservorio de este tipo es posible instalar una pequeña planta geotérmica que provea de poco más de 1 MW de potencia eléctrica por 20 años, disminuyendo la temperatura del reservorio en sólo 10 °C. Con la información recabada hasta ahora en la península de Baja California, y de las estimaciones realizadas con geotermómetros, se puede concluir que en esta región sería muy conveniente la instalación de pequeñas plantas con capacidades como ésta.

### 4.3 CICLO BINARIO CONVENCIONAL

El primer sistema a analizar para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos de baja entalpía será una planta común de ciclo binario en la que el fluido de trabajo empleado sea agua desmineralizada. En tal sistema, el agua geotérmica cede energía en forma de calor al fluido de trabajo hasta evaporarlo, a través de dos intercambiadores de calor de carcasa y tubos: un calentador y un evaporador, figura 4.1.

Una vez evaporado, el fluido de trabajo acciona la turbina y después es llevado al condensador, donde cede energía hasta condensarse. El condensado se bombea y lleva al calentador, para iniciar nuevamente el ciclo. El agua de enfriamiento, en este caso, será agua a 20 °C. La temperatura del agua geotérmica considerada en superficie será de 140 °C, y su gasto másico se hará variar entre 15 y 45 kg/s.

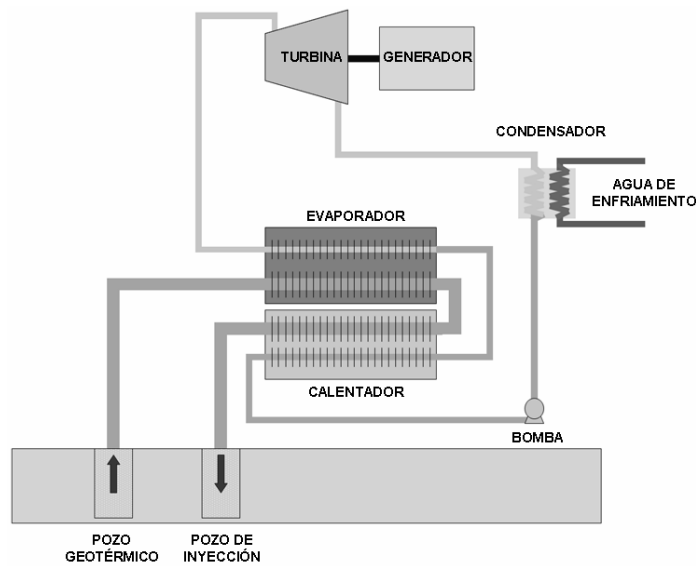


Figura 4.1 Planta convencional de ciclo binario  
[El autor]

Para calcular la potencia eléctrica generada por el sistema, se recurrirá a una hoja de cálculo por computadora en la que se introducirán las ecuaciones de balance de masa y energía para cada uno de los procesos del ciclo. Los datos de entrada serán los siguientes:

- Temperatura y presión iniciales del fluido geotérmico: 140 °C y 4.62 bar (un bar arriba de la presión de saturación a 140 °C), respectivamente.
- Temperatura inicial y final del agua de enfriamiento: 20 °C y 30 °C, respectivamente.
- Presión de condensación: 0.1 bar.

- Eficiencias de la turbina, intercambiadores de calor y bombas: 70%, 80% y 75%, respectivamente.
- El acercamiento de temperaturas entre los fluidos contenidos en los intercambiadores de calor será de 10 °C, y la caída de presión en esos mismos equipos será de 1 bar.

El punto *B* de la figura 4.2 representa el punto en el cual el fluido geotérmico es admitido al evaporador, en donde posee la temperatura  $T_B$ , de 140 °C, y la presión  $P_B$ , de 4.62 bar.

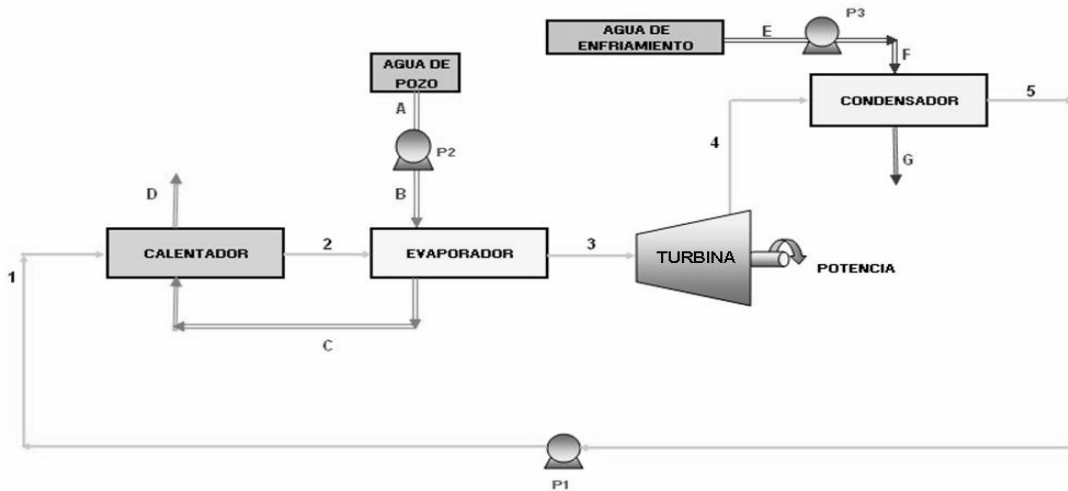


Figura 4.2 Diagrama del ciclo binario convencional a analizar  
[El autor]

En el evaporador, el fluido de trabajo absorbe energía del agua geotérmica y es llevado de la fase de líquido saturado a la de vapor saturado, a la presión constante  $P_3$ . Esta presión de evaporación puede variar entre los valores de 0.1 bar (presión en el condensador) y la presión de saturación a 130 °C (temperatura máxima que podría alcanzar el agua desmineralizada). El valor de  $P_3$  que haga que la potencia eléctrica suministrada sea máxima se podrá obtener por medio de la hoja de cálculo, una vez introducidas todas las ecuaciones, y a partir de cualquier valor inicial de  $P_3$ .

El balance de energía en el evaporador estará dado por la siguiente ecuación:

$$m_{ageo} (h_C - h_B) \eta_{evap} = m_{aDM} (h_g|_{P_3} - h_f|_{P_3}) \quad [4.2]$$

Donde el subíndice “*ageo*” hace referencia al agua geotérmica y el subíndice “*aDM*” se refiere al agua desmineralizada (o agua DM);  $\eta_{evap}$  es la eficiencia del evaporador. El valor de la entalpía  $h_C$  se puede obtener sabiendo que la temperatura en *C* será 10 °C mayor que la temperatura en *2* (debido al acercamiento de temperaturas del evaporador).



Con las entalpías de líquido saturado y vapor saturado ( $h_f$  y  $h_g$ ) a la presión  $P_3$ , y a partir de la ecuación anterior, se puede calcular la masa de agua DM que circula por el circuito.

Para calcular la potencia teórica suministrada por la turbina, se considerará el proceso de 3 a 4 como adiabático; por lo tanto, la entropía de la mezcla vapor-agua en 4 ( $s_{x4}$ ) será igual a la entropía en 3 ( $s_3$ ):

$$s_{x4} = s_3 \quad [4.3]$$

Con este valor de  $s_{x4}$ , y con  $s_f$  y  $s_g$  en 4, es posible calcular la calidad de la mezcla,  $x$ , al final de la expansión en la turbina:

$$x = \frac{s_{x4} - s_f|_{P_4}}{s_g|_{P_4} - s_f|_{P_4}} \quad [4.4]$$

Ahora se puede determinar la entalpía de la mezcla al final de la expansión:

$$h_{x4} = x(h_{g4} - h_{f4}) + h_{f4} \quad [4.5]$$

La potencia bruta teórica ( $Pot_{teo}$ ) suministrada por el sistema será, por lo tanto:

$$Pot_{teo} = \dot{m}_{aDM} (h_{g3} - h_{x4}) \quad [4.6]$$

Incluyendo la eficiencia de la turbina ( $\eta_t$ ), se puede calcular la potencia bruta real:

$$Pot_{real} = \eta_t Pot_{teo} \quad [4.7]$$

La cantidad de agua necesaria para el enfriamiento del fluido de trabajo en el condensador se calculará a partir de la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{aenf} Cp_{aenf} \Delta T_{aenf} \eta_{int} = \dot{m}_{aDM} (h_{f4} - h_{g4}) x \quad [4.8]$$

Donde  $\dot{m}_{aenf}$ ,  $Cp_{aenf}$  y  $\Delta T_{aenf}$  representan el gasto másico, capacidad calorífica a presión constante e incremento de temperatura, respectivamente, del agua de enfriamiento; y  $\eta_{int}$  es la eficiencia del intercambio de calor en el condensador.

El condensado se bombea al calentador, donde eleva su temperatura e inicia nuevamente el ciclo. La entalpía final del agua geotérmica,  $h_D$ , después de ceder energía en el calentador, se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{ageo} (h_D - h_C) \eta_{int} = \dot{m}_{aDM} (h_{f3} - h_1) \quad [4.9]$$

Donde  $\eta_{int}$  es la eficiencia del calentador y  $h_l$  es la entalpía del agua desmineralizada a la presión  $P_3$  y a la temperatura del condensado.

La potencia neta del sistema se podrá obtener restando a la potencia bruta real el consumo eléctrico de las bombas. La potencia consumida por cada bomba ( $Pot_{bomba}$ ), considerando el proceso de bombeo como adiabático, dependerá del gasto volumétrico ( $G_{vol}$ ), el incremento de presión suministrado ( $\Delta P$ ) y la eficiencia de la bomba ( $\eta_{bomba}$ ):

$$Pot_{bomba} = \frac{G_{vol} \Delta P}{\eta_{bomba}} \quad [4.10]$$

Mediante programación en la hoja de cálculo, y con todas las ecuaciones anteriores, se pueden hacer las simulaciones del sistema geotermoeléctrico ante distintos gastos másicos y temperaturas de agua de pozo. En la figura 4.4 (página siguiente) se muestra la simulación hecha para un gasto másico de agua geotérmica de 40 kg/s, a una temperatura de 140 °C. La presión de evaporación óptima en este caso fue de 0.64 bar, con la cual se logra una potencia neta de 457 kW.

El que exista una presión  $P_3$  a la cual la potencia sea máxima, y que después de este valor la potencia empiece a disminuir, figura 4.3, se debe a que, al ir incrementando la presión de evaporación, el vapor generado poseerá mayor temperatura y presión, con lo que podrá ceder mayor energía en la turbina, pero la masa de agua desmineralizada que pueda evaporarse será cada vez menor. En la figura 4.5 se muestra la energía cedida por el vapor y la masa de vapor generada, dependiendo de la presión en el evaporador.

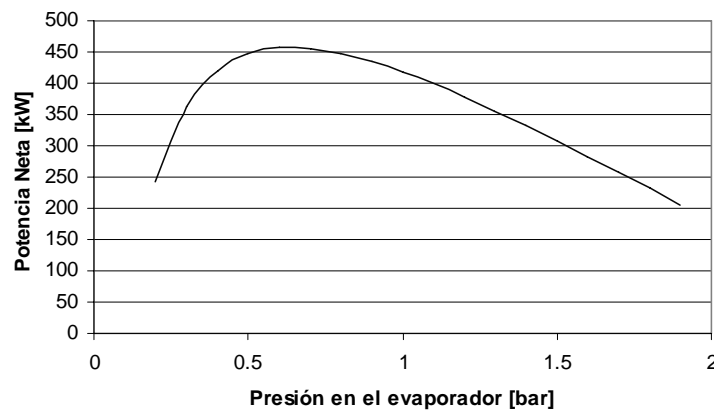
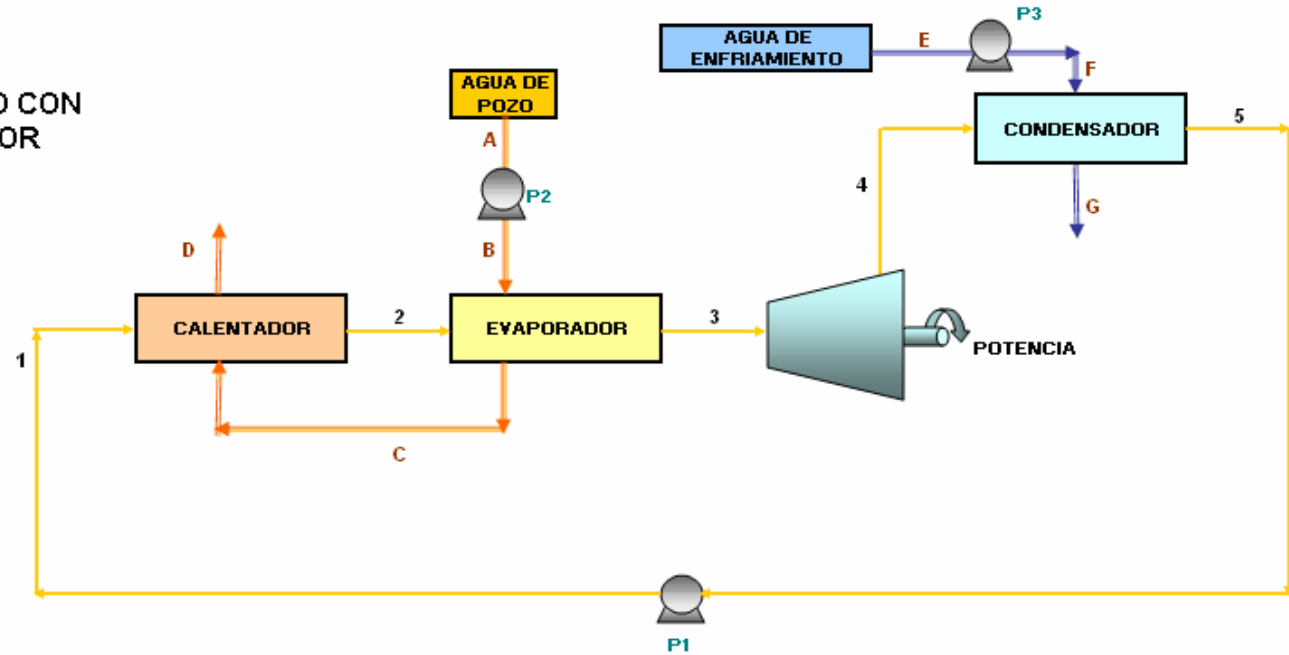


Figura 4.3 Comportamiento de la potencia neta al variar la presión de evaporación  $P_3$   
[El autor]

### CICLO BINARIO CON EVAPORADOR



**ACOTACIONES:**

<b>DATO</b>
<b>CÁLCULO</b>
<b>VALOR DE TABLAS</b>

Efic. Bombas [%] =	75
Efic. Turbina [%] =	70
Efic. Intercamb. [%] =	80
Acerc. Intercamb. [°C] =	10
ΔP Intercamb. [bar] =	1

Punto	Agua caliente de pozo				Fluido de trabajo en el circuito					Agua de enfriamiento			POTENCIA [kW]	
	A	B	C	D	1	2	3	4	5	E	F	G	BRUTA	NETA
T [°C]	140	140	97.49	94.94	45.81	87.49	87.49	45.81	45.81	20	20	30.00	486	457
P [bar]	3.62	4.62	3.62	2.62	2.64	1.64	0.64	0.1	0.1	1	2	1		
Gasto [kg/s] =	40	40	40	40	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52	165.43	165.43	165.43		
Gasto [m3/s]	0.043	0.043	0.042	0.042	0.003	0.003	6.512		0.003	0.166	0.166	0.166		
Densidad [kg/m3] =	926.13	926.19	960.26	962.01	989.94	967.01	0.39		989.83	998.21	998.25	995.65		
Entalpia Lic. [kJ/kg]	589.16	589.23	408.77	399.96	192.03	366.54		191.81	191.81	84.01	84.10	125.82		
Entalpia gas [kJ/kg]							2655.42	2583.86						
Entalpia MEZCLA [kJ/kg]								2380.32						
Calidad [%]								91.49						
Entropia Lic. [kJ/kgK]	1.74	1.74	1.28	1.25	0.65	1.16		0.65	0.65					
Entropia gas [kJ/kgK]							7.51	8.15						
Entropia MEZCLA [kJ/kgK]								7.51						
Carga Térmica [kW]		7218.26		440.28					5521.39					
Pot. Bomba [kW]	5.76				0.86					22.10				

Figura 4.4 Simulación en hoja de cálculo del sistema binario con evaporador  
[El autor]

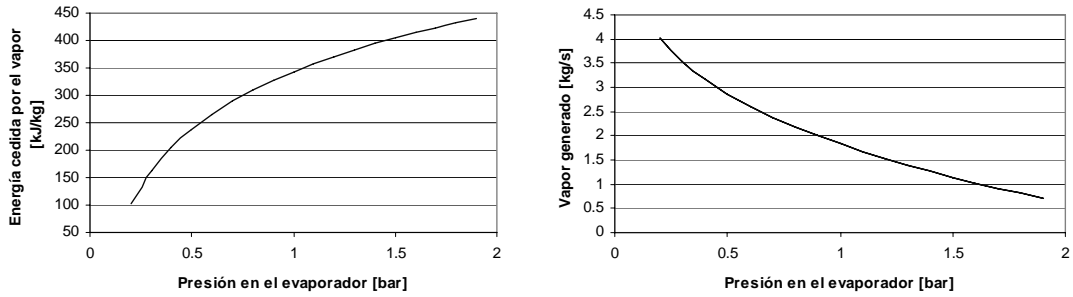


Figura 4.5 Energía cedida por el vapor y el gasto másico obtenido, respecto a la presión  $P_3$  [El autor]

El diagrama temperatura-entropía del ciclo simulado es el mostrado en la figura 4.6.

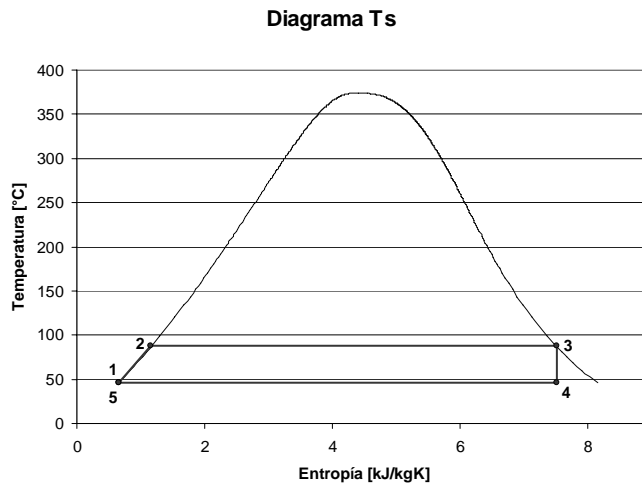


Figura 4.6 Diagrama T-s del ciclo binario con evaporador [El autor]

El proceso de 1 a 3 es en el cual el agua geotérmica cede su energía para, primero precalentar y después, evaporar el fluido de trabajo. La trayectoria que siguen los dos fluidos en este proceso se muestra en la siguiente figura.

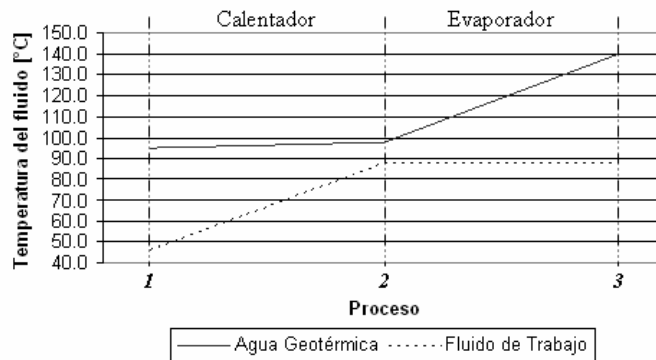


Figura 4.7 Temperatura de los fluidos (geotérmico y de trabajo) dentro de los intercambiadores [El autor]

En el caso de las plantas geotermoeléctricas, el parámetro que se emplea para medir la eficiencia neta del proceso de conversión de energía térmica en eléctrica es la denominada eficiencia de utilización<sup>9</sup>, la cual se puede calcular de la siguiente manera:

$$\eta_u = \frac{Pot_{neta}}{m_{geo}e} \quad [4.11]$$

Donde  $e$  representa la energía específica del fluido geotérmico, que está dada por:

$$e = (h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0) \quad [4.12]$$

$h_1$  y  $s_1$  indican la entalpía y entropía iniciales del fluido,  $s_0$  representa la entropía del fluido a condiciones ambientales (o estado *muerto*) y  $T_0$  es la temperatura ambiente, en grados Kelvin. En nuestro caso, al considerar una temperatura ambiente de 20 °C, y una presión de 1.01325 bar, se tiene que para el ciclo en análisis la eficiencia de utilización es:

$$\eta_u = 13.7\%$$

Tal valor es bajo comparado con los ciclos binarios que emplean refrigerantes como fluido de trabajo, cuyas eficiencias de utilización están alrededor del 18%, para la misma temperatura del recurso geotérmico que la empleada en el presente análisis<sup>10</sup>.

Finalmente, en la siguiente tabla se muestra la potencia generada por este sistema ante distintos gastos máxicos de agua geotérmica.

TABLA 4.1 Potencia eléctrica del sistema binario con evaporador, respecto al flujo de agua geotérmica  
[El autor]

Agua Geotérmica [kg/s]	Potencia Generada [kW]
15	171
20	229
25	286
30	343
35	400
40	457
45	514

Se observa que es posible generar hasta 514 kW de potencia eléctrica si se extrajeran 45 kg/s de agua geotérmica, a 140 °C. Tal energía podría ser muy útil en el suministro eléctrico de varios de los sitios estudiados por el equipo IMPULSA; sin embargo, el transporte y mantenimiento de los intercambiadores de carcasa y tubos hacen que este sistema sea inadecuado y costoso en localidades de difícil acceso. Por ello, a continuación se analizarán dos propuestas para dar solución a estos problemas.

<sup>9</sup> DiPippo, Small geothermal power plants, 1999.

<sup>10</sup> Ibid.

#### 4.4 CICLO BINARIO CON UNA EVAPORACIÓN FLASH

Uno de los inconvenientes que presenta el ciclo binario tradicional es que el evaporador y el calentador, al estar en contacto directo con el agua geotérmica, sufren de severos problemas de corrosión e incrustación, por lo que tienen que ser sometidos a constante mantenimiento, el cual resulta complicado y costoso. Aunado a esto, la eficiencia de tales equipos son bajas, y si se desea un mayor acercamiento entre las temperaturas de los fluidos contenidos en ellos, el tamaño de las unidades debe ser mucho mayor.

Para evitar tales problemas, en el presente trabajo se propone el uso de un sistema binario en el cual se sustituye el evaporador y el calentador por un intercambiador de calor de placas, una válvula de estrangulamiento (placa orificio) y un separador de vapor. De esta manera, sólo el intercambiador de placas entrará en contacto con el fluido geotérmico.

En tal sistema, figura 4.8, el agua geotérmica calienta al fluido de trabajo, a través del intercambiador de calor de placas, hasta convertirlo en líquido saturado. Posteriormente, el fluido de trabajo se hace pasar a través de la placa orificio, donde disminuye su presión y, en consecuencia, parte de él evapora. El vapor generado es separado del líquido (en un separador ciclónico) y acciona la turbina. A continuación, el vapor se condensa y mezcla con el líquido rechazado del separador, para finalmente ser llevado al intercambiador de placas y repetir el ciclo.

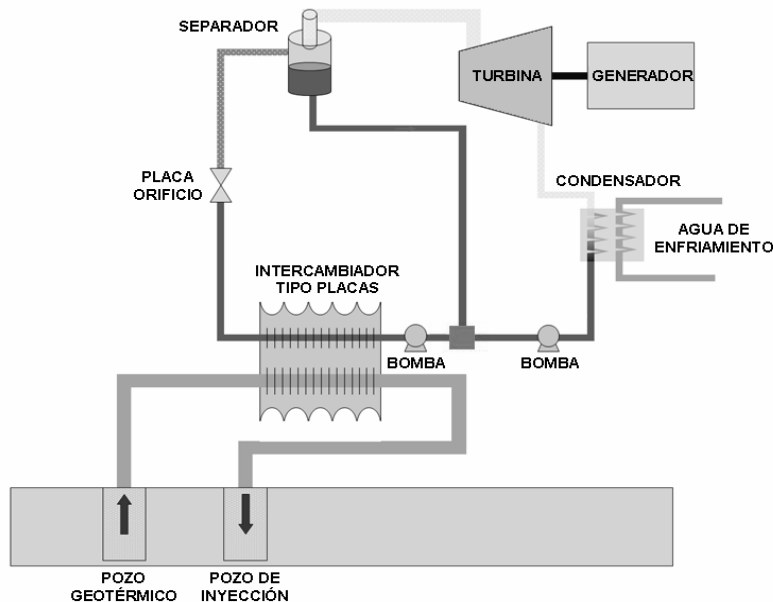


Figura 4.8 Planta de ciclo binario con una evaporación flash  
[El autor]

La ventaja que presenta este sistema es que, al emplear un intercambiador de calor de placas, la eficiencia en la generación de vapor se incrementa; ya que este tipo de equipos permiten acercamientos de hasta 1 °C entre los fluidos y las pérdidas en el intercambio de calor son bajas, lo cual es sumamente importante en el aprovechamiento de la energía geotérmica. Asimismo, el espacio ocupado por tales intercambiadores es menor y su mantenimiento es más sencillo, comparado con los de carcasa y tubos.

En la figura 4.9 se muestran ambos intercambiadores; puede observarse que el área de intercambio en el de placas es extensa, en un volumen reducido. Si se deseara incrementar el área de un intercambiador de placas, bastaría con agregar más láminas, sin necesidad de comprar un nuevo equipo.

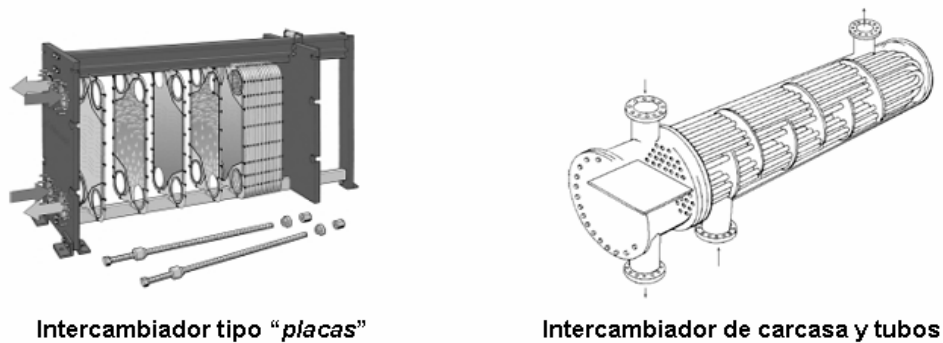


Figura 4.9 Intercambiadores de calor  
[Alfa Laval, 2007]

El acercamiento de temperaturas logrado por ambos intercambiadores se puede observar en la siguiente figura. En uno de placas, figura 4.10-A, el fluido frío puede alcanzar una temperatura mayor que la del fluido caliente a su salida<sup>11</sup>, lo cual no sería posible con sólo un intercambiador de carcasa y tubos, figura 4.9-B.

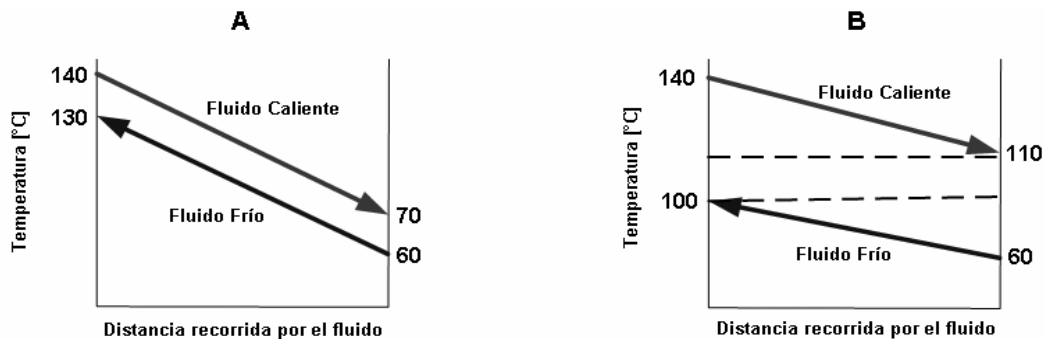


Figura 4.10 Acercamiento de temperaturas entre los fluidos dentro de A) Un intercambiador de placas y B) Un intercambiador de carcasa y tubos  
[Alfa Laval, 2007]

<sup>11</sup> Alfa Laval, 2007.

En este nuevo sistema con evaporación *flash*, y con la intención de reducir el espacio total de la planta, se puede considerar el uso de una turbina de alta velocidad (de entre 10,000 y 20,000 rpm). Tales turbinas proporcionan además altas eficiencias<sup>12</sup>, como la considerada en los presentes análisis, de 70%. El separador de vapor empleado puede ser del tipo ciclónico, con el cual se logra la separación de incluso el 99.9% del líquido<sup>13</sup>.

Para calcular la potencia eléctrica y demás parámetros de este ciclo, también se recurrirá a una hoja de cálculo por computadora. Los datos de entrada serán los mismos que para el sistema binario con evaporador, excepto la eficiencia del intercambiador y el acercamiento de temperaturas en él, que en este caso pueden ser de 85% y 5 °C, respectivamente. Con el fin de incrementar la eficiencia, se considerará el uso de un economizador entre los puntos 7 y 8, figura 4.11, que precalentará el condensado hasta la temperatura del líquido extraído del separador, antes de mezclarse con él.

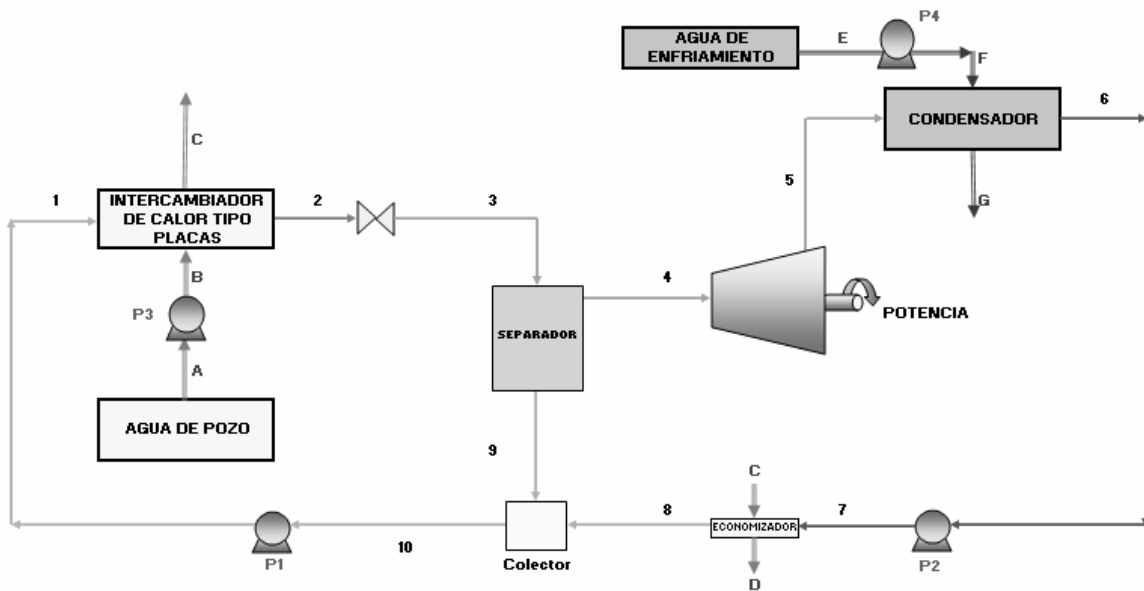


Figura 4.11 Diagrama del ciclo binario con una evaporación flash a analizar  
[El autor]

En este sistema, la temperatura del agua desmineralizada en 2 será de 135 °C, a la presión de saturación. La presión en 3, después de la placa orificio, puede variar entre 0.1 bar y 3.13 bar (presión en 2); en este caso habrá una  $P_3$  (presión de separación) óptima a la cual se obtenga una potencia máxima. Para empezar con el análisis se puede suponer cualquier valor inicial para esta presión.

<sup>12</sup> Barber-Nichols, 2007.

<sup>13</sup> Armstead, Energía geotérmica, 1989.



Igual que en el análisis anterior, el punto  $B$  representa la toma en superficie del fluido geotérmico a 140 °C y 4.62 bar. En el punto  $1$  la temperatura del agua desmineralizada será la misma que en  $9$  (cuyo valor depende de  $P_3$ ), y la presión será la del punto  $2$  más el decremento de presión en el intercambiador. La temperatura en  $C$  será igual a  $T_1 + \Delta T_{\text{int}}$ , donde  $\Delta T_{\text{int}}$  representa el acercamiento de temperaturas entre los fluidos en el intercambiador.

La cantidad de agua desmineralizada en el circuito se puede calcular a partir del balance de energía en el intercambiador:

$$\dot{m}_{\text{ageo}}(h_C - h_B)\eta_{\text{int}} = \dot{m}_{\text{ADM}}(h_2 - h_1) \quad [4.13]$$

De  $2$  a  $3$  se tendrá un proceso isentálpico, por lo tanto la entalpía de la mezcla en  $3$  ( $h_{x_3}$ ) será igual a  $h_2$ . La calidad de la mezcla obtenida al disminuir la presión será:

$$x = \frac{h_{x_3} - h_f|_{P_3}}{h_g|_{P_3} - h_f|_{P_3}} \quad [4.14]$$

La cantidad de vapor generado se puede calcular a partir de la calidad obtenida y la masa de agua desmineralizada:

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = \dot{m}_{\text{ADM}} x \quad [4.15]$$

Con este valor se puede obtener la potencia bruta entregada por la turbina, de la misma manera que en el procedimiento desarrollado para el ciclo binario con evaporador, así como la masa de agua de enfriamiento y la potencia neta del sistema.

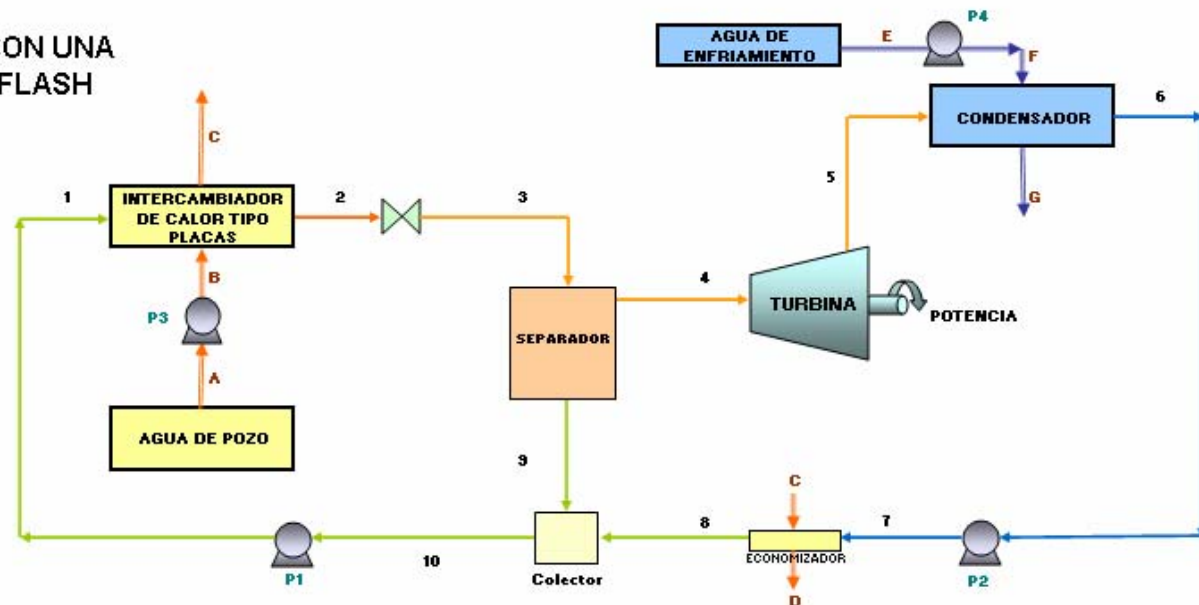
En el economizador, el agua geotérmica sobrante calentará al condensado desde  $T_7$  (temperatura de saturación a 0.1 bar) hasta  $T_9$ . La entalpía final del agua geotérmica  $h_D$ , al salir del economizador, se calculará con la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{\text{ageo}}(h_D - h_C)\eta_{\text{int}} = \dot{m}_{\text{ADM}}(h_9 - h_7) \quad [4.16]$$

Con estas ecuaciones ya es posible calcular los parámetros de operación del sistema. En la simulación hecha, figura 4.12, se observa que la presión de separación óptima en este caso es de 0.7 bar, con la cual se logra una potencia neta de 531 kW.

En este ciclo, al ir disminuyendo la presión en el separador, la masa de vapor generado es mayor, pero su energía va siendo cada vez más baja; de aquí que haya una presión a la cual la potencia suministrada sea máxima y después empiece a disminuir, figura 4.13.

## CICLO BINARIO CON UNA EVAPORACIÓN FLASH



ACOTACIONES:  
**DATO**  
**CÁLCULO**  
**VALOR DE TABLAS**

DATOS:

Efic. Bombas [%] =	75
Efic. Turbina [%] =	70
Efic. Intercamb. [%] =	85
Acerc. Interc. [°C] =	5
ΔP Intercamb. [bar] =	1

POTENCIA [kW]	
BRUTA	NETA
577	531

Punto	Agua caliente de pozo				Fluido de trabajo en el circuito										Agua de enfriamiento		
	A	B	C	D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	E	F	G
T [°C]	140	140	34.37	32.07	89.37	135	89.37	89.37	45.81	45.81	45.81	89.37	89.37	89.37	20	20	30.00
P [bar]	3.62	4.62	3.62	2.62	4.13	3.13	0.70	0.70	0.1	0.10	1.70	0.70	0.70	0.70	1	2	1
Gasto [kg/s]	40	40	40	40	34.09	34.09	34.09	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	31.24	34.09	175.05	175.05	175.05
Gasto [m³/s]	0.043	0.043	0.042	0.041	0.035	0.037		6.731		0.003	0.003	0.003	0.032	0.035	0.175	0.175	0.176
Densidad [kg/m³]	326.13	326.13	362.03	363.38	365.47	330.54		0.42		383.83	383.30	365.32	365.32	365.32	938.21	938.25	935.65
Entalpia LIQ [kJ/kg]	583.16	583.23	338.16	386.36	377.16	567.74		376.30		191.81	191.81	191.35	376.30	376.30	84.01	84.10	125.82
Entalpia GAS [kJ/kg]								2659.48		2583.86							
Entalpia MEZCLA [kJ/kg]								567.74		2370.08							
Calidad [%]								8.36		31.06							
Entropia LIQ [kJ/kgK]					1.19	1.63		1.19	0.65	0.65	0.65	1.19		1.19			
Entropia GAS [kJ/kgK]								7.48	7.48	8.15							
Entrop. MEZCLA [kJ/kgK]								1.72	1.48								
Carga Térmica [kW]		7642.43								6207.83		527.03					
Pot. Bomba [kW]	5.76				16.15						0.61				23.38		

Figura 4.12 Simulación en hoja de cálculo del sistema binario con una evaporación tipo flash  
 [El autor]

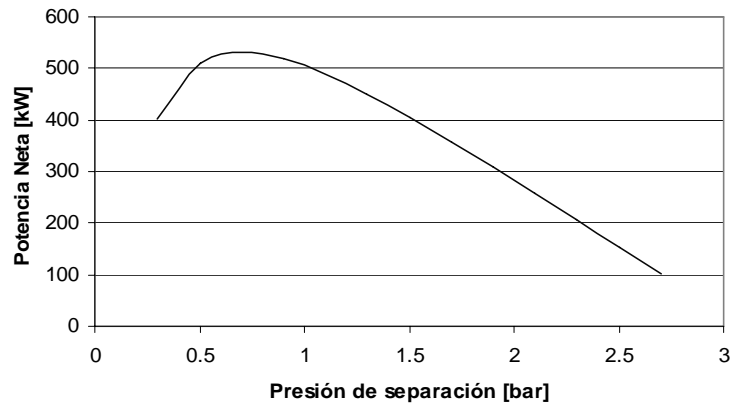


Figura 4.13 Comportamiento de la potencia neta al variar la presión de separación  $P_3$   
[El autor]

El diagrama temperatura-entropía del ciclo con una evaporación flash se muestra en la figura 4.14. Del punto 2 al 3 se lleva a cabo el estrangulamiento, a entalpía constante; a partir del punto 3 se traza la trayectoria que sigue el vapor generado en la estrangulación.

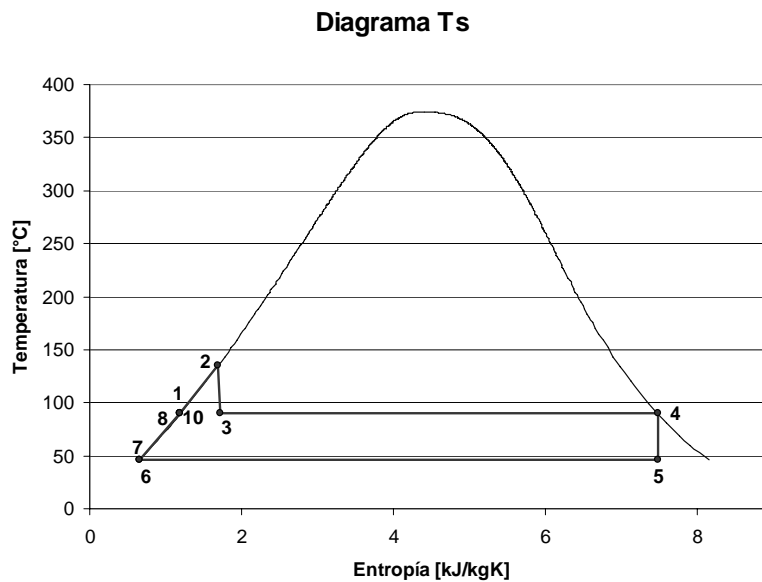


Figura 4.14 Diagrama T-s del ciclo binario con una evaporación flash  
[El autor]

Considerando las mismas condiciones ambientales que para el ciclo con evaporador, se tiene que para el ciclo en análisis la eficiencia de utilización es:

$$\eta_u = 16.0\%$$

Haciendo variar el gasto másico de agua geotérmica, y a partir del programa en la hoja de cálculo, se pueden obtener los valores de potencia eléctrica mostrados en la tabla 4.2.

TABLA 4.2 Potencia eléctrica del sistema con una evaporación *flash*, respecto al flujo de agua geotérmica  
[El autor]

Agua Geotérmica [kg/s]	Potencia Generada [kW]
15	199
20	266
25	332
30	399
35	465
40	531
45	598

Se observa que la potencia generada con este sistema, al emplear un flujo de agua geotérmica de 45 kg/s a 140 °C, es de 598 kW, valor superior al generado con un sistema binario convencional, con las mismas condiciones de entrada.

Resulta evidente que este nuevo ciclo es más apropiado para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos de baja entalpía que los ciclos binarios comunes, pues su eficiencia de utilización es mayor y las características de sus componentes disminuyen los costos de operación y mantenimiento de la planta.

Como comparación, se muestran las áreas de transferencia de calor necesarias en los intercambiadores, y el espacio requerido por tales equipos, para los dos sistemas binarios ya analizados<sup>14</sup>, tabla 4.3.

TABLA 4.3 Área de transferencia y volumen del intercambiador, respecto al flujo de agua geotérmica  
[El autor]

Agua Geot. [kg/s]	Sistema con evaporador			Sistema con una evaporación <i>flash</i>		
	Potencia [kW]	Área Int. [m <sup>2</sup> ]	Vol. Int. [m <sup>3</sup> ]	Potencia [kW]	Área Int. [m <sup>2</sup> ]	Vol. Int. [m <sup>3</sup> ]
15	171	94	1.34	199	143	0.48
20	229	125	1.78	266	191	0.64
25	286	156	2.23	332	239	0.80
30	343	187	2.67	399	286	0.95
35	400	218	3.12	465	334	1.11
40	457	250	3.57	531	382	1.27
45	514	281	4.01	598	430	1.43

De la tabla anterior, puede notarse que el volumen necesario para el intercambiador de calor en este nuevo sistema puede ser el 35% del volumen ocupado por los intercambiadores de un ciclo binario convencional; lo que lo convierte en un sistema más práctico para su transporte e instalación, en una mayor cantidad de comunidades.

<sup>14</sup> El cálculo de tales valores y las consideraciones hechas se explican en el anexo 1 del presente trabajo.

#### 4.5 CICLO BINARIO CON DOBLE EVAPORACIÓN FLASH

Al llevar a cabo el estrangulamiento del líquido extraído del separador del sistema anterior, es posible generar más vapor e introducirlo en una etapa de menor presión en la turbina, como se muestra en la figura 4.15. Con tal arreglo es posible obtener una mayor potencia eléctrica, para las mismas condiciones que en los sistemas ya analizados.

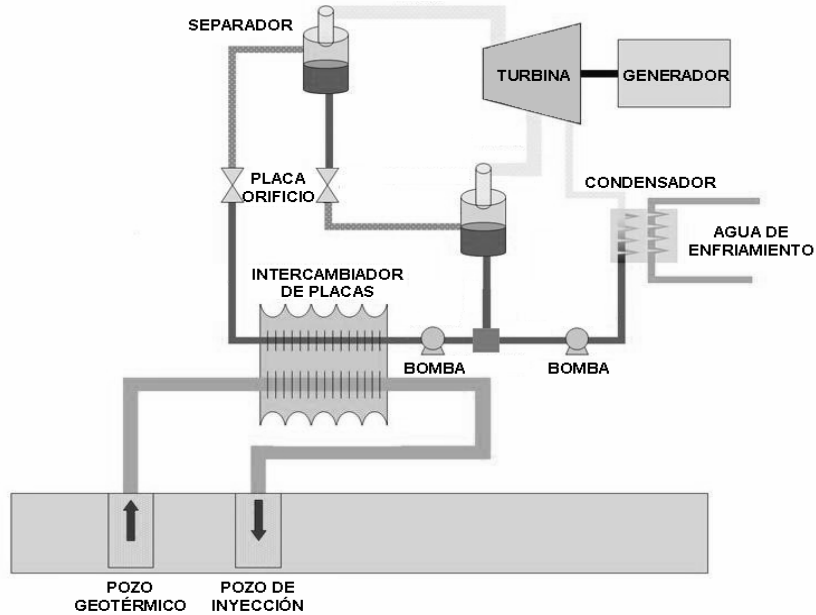


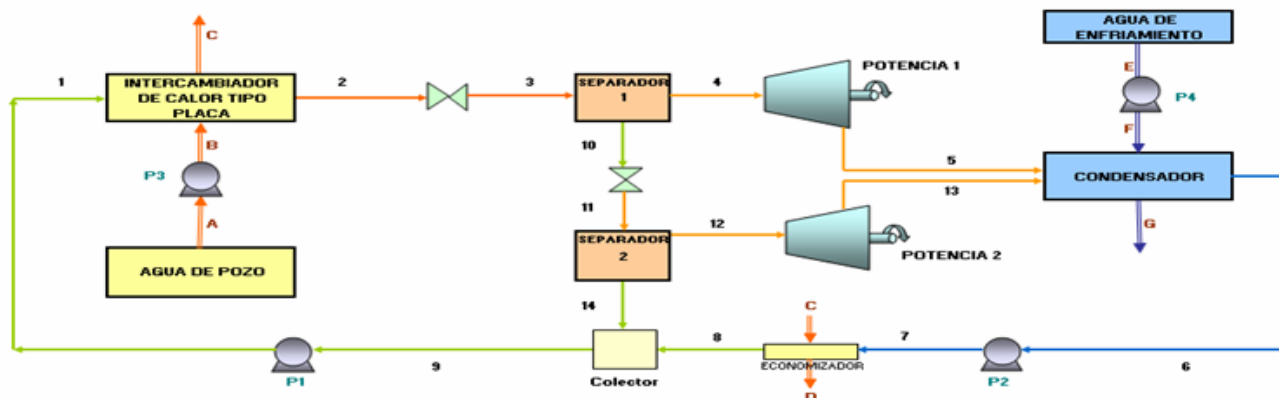
Figura 4.15 Planta de ciclo binario con doble evaporación flash  
[El autor]

En este caso, el análisis del sistema se puede hacer de la misma forma que en el sistema con solo una evaporación, agregando el trabajo realizado por el vapor generado en una segunda estrangulación. La calidad de la mezcla y la masa de vapor generada en el segundo estrangulamiento se podrá calcular a partir del líquido extraído en el primer separador, con las ecuaciones 4.14 y 4.15.

El cálculo de los demás parámetros se puede lograr de la misma manera que en el sistema anteriormente analizado. La simulación de este nuevo ciclo se muestra en la figura 4.16, donde se observa que la potencia suministrada por el sistema asciende a 693 kW.

Dado que hay dos puntos en los cuales el agua desmineralizada evapora súbitamente, en este caso se tendrán dos presiones de separación; en la simulación hecha se buscaron y emplearon las presiones de estrangulamiento con las cuales se obtendría la máxima potencia del sistema, para un flujo de agua geotérmica de 40 kg/s a 140 °C.

**CICLO BINARIO  
CON DOBLE  
EVAPORACIÓN  
FLASH**



**ACOTACIONES:**  
**DATO**  
**CÁLCULO**  
**VALOR DE TABLAS**

**DATOS:**

Efic. Bombas [%] =	75
Efic. Turbina [%] =	70
Efic. Intercamb. [%] =	85
Acero. Interc. [°C] =	5
ΔP Intercamb. [bar] =	1

Punto	Agua caliente de pozo				Agua de enfriamiento			POTENCIA BRUTA [kW]	POTENCIA META [kW]	
	A	B	C	D	E	F	G			
T [°C]	140	140	80.76	78.39	20	20	30.00	503	246	693
P [bar]	3.62	4.62	3.62	2.62	1	2	1			
Gasto [kg/s] =	40	40	40	40	223.47	223.47	223.47			
Gasto [m³/s] =	0.043	0.043	0.041	0.041	0.224	0.224	0.224			
Densidad [kg/m³] =	926.13	926.19	971.43	972.86	998.21	998.25	995.65			
Entalpia Lic [kJ/kg]	589.16	589.23	338.47	328.77	84.01	84.10	125.82			
Entalpia gas [kJ/kg]										
Entalpia mezcla [kJ/kg]										
Calidad [%]										
Entropia Lic [kJ/kgK]										
Entropia gas [kJ/kgK]										
Entropia mezcla [kJ/kgK]										
Carga Térmica [kW]		10030.25								
Pot. Bomba [kW]	5.76				29.85					

Punto	Fluido de trabajo en el circuito													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
T [°C]	75.76	135	105.14	105.14	45.81	45.81	45.81	75.76	75.76	105.14	75.76	75.76	45.81	75.76
P [bar]	4.60	3.60	1.21	1.21	0.1	0.1	1.40	0.40	0.40	1.21	0.40	0.40	0.1	0.40
Gasto [kg/s] =	34.07	34.07	34.07	1.93	1.93	3.64	3.64	3.64	34.07	32.15	32.15	1.71	1.71	30.43
Gasto [m³/s] =	0.035	0.037		2.723		0.004	0.004	0.004	0.035	0.034		6.868		0.031
Densidad [kg/m³] =	974.54	930.56		0.71		989.83	989.89	974.36	974.36	954.60		0.25		974.36
Entalpia Lic [kJ/kg]	317.57	567.78	440.85		191.81	191.81	191.92	317.23	317.23	440.85	317.23		191.81	317.23
Entalpia gas [kJ/kg]			2683.60	2683.60	2583.86						2635.89	2635.89	2583.86	
Entalpia mezcla [kJ/kg]			567.78		2311.08						440.85		2431.25	
Calidad [%]			5.66		88.60						5.33		93.62	
Entropia Lic [kJ/kgK]				1.36	0.65							1.02	0.65	
Entropia gas [kJ/kgK]				7.29	8.15							7.67	8.15	
Entropia mezcla [kJ/kgK]					7.29								7.67	
Carga Térmica [kW]						7924.95		456.41						
Pot. Bomba [kW]	19.60						0.64							

Figura 4.16 Simulación en hoja de cálculo del sistema binario con doble evaporación tipo flash

[El autor]

La eficiencia de utilización obtenida en este caso es:

$$\eta_u = 20.9\%$$

El diagrama T-s de este ciclo se muestra en la figura 4.17; la trayectoria del vapor generado en la segunda estrangulación se muestra en línea discontinua.

**Diagrama Ts**

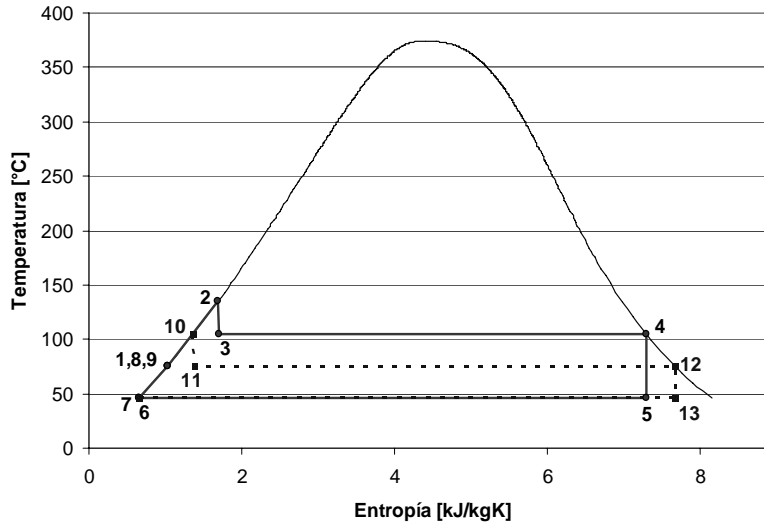


Figura 4.17 Diagrama T-s del ciclo binario con doble evaporación flash  
[El autor]

Finalmente, en la tabla 4.4 se muestra la potencia generada por este sistema ante distintos flujos de agua geotérmica.

TABLA 4.4 Potencia eléctrica del sistema con doble evaporación flash, respecto al flujo de agua geotérmica  
[El autor]

Agua Geotérmica [kg/s]	Potencia Generada [kW]
15	260
20	346
25	433
30	519
35	606
40	693
45	779

Como se observa, la potencia y la eficiencia de utilización de este ciclo superan a las de los anteriores; sin embargo, el sistema ahora debe poseer dos separadores de vapor y una turbina de por lo menos dos etapas.

De los análisis realizados para los tres sistemas de generación, se puede apreciar que las dos propuestas alternas al ciclo binario convencional son más eficientes; con las cuales es posible obtener una mayor potencia eléctrica a partir de la misma cantidad de flujo geotérmico. Tales sistemas resultarían muy adecuados en la implementación de un programa de electrificación a pequeña escala en varias de las localidades de la península de Baja California, y en zonas de la república donde existan yacimientos similares.

Además, en este caso se consideró al agua desmineralizada como fluido de trabajo, pues los gastos que involucra el transporte de refrigerantes son altos, debido a la localización de las áreas en estudio (Baja California); pero si el uso de tales fluidos no involucrara altos costos, como sucede en otras partes de la república, la potencia producida por estos mismos sistemas, al emplear refrigerantes, se incrementaría de manera significativa.

Una planta de ciclo binario de 7 MW, en Mammoth, California, E.U.<sup>15</sup>, cuyo fluido de trabajo es isobutano, emplea un recurso geotérmico a 169 °C con un gasto másico de 220 kg/s. A manera de ejemplo, se simuló el sistema binario con dos evaporaciones *flash* para estas mismas condiciones, y se encontró que la eficiencia bruta de utilización del sistema de doble *flasheo*, empleando agua desmineralizada, sería del 37%; tal eficiencia supera a la eficiencia real de la planta, del 32.4%.

Con esto se observa que, incluso con agua desmineralizada, la eficiencia del sistema con dos evaporaciones *flash* sería mayor que la de un sistema binario tradicional que emplea un refrigerante como fluido de trabajo, lo cual denota el gran potencial de las propuestas.

En el caso de implementar alguno de estos sistemas de generación eléctrica en las regiones de la península de Baja California, o en lugares cercanos al mar, se podría considerar el aprovechamiento del agua geotérmica sobrante para la desalación de agua de mar, que en un principio puede ser empleada como agua de enfriamiento. La cantidad de agua que podría desalarse de esta manera se calculará en el siguiente capítulo.

---

<sup>15</sup> DiPippo, Small geothermal power plants, 1999.



## **CAPÍTULO 5. ANÁLISIS PARA LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR CON LA ENERGÍA CALORÍFICA DEL AGUA GEOTÉRMICA**

De los análisis llevados a cabo en el capítulo anterior del presente trabajo, puede observarse que después de emplear el agua geotérmica en la generación eléctrica, su temperatura sigue siendo alta, y su energía bien podría ser empleada en alguna de las tantas aplicaciones que tienen los recursos geotérmicos, como las mencionadas en el primer capítulo.

Dado que en las zonas en las que podrían ser instalados los sistemas propuestos de generación eléctrica también se presentan problemas de distribución de agua potable, se estudiará la posibilidad de desalar agua de mar con la energía remanente en el agua geotérmica, para proveer agua potable y, además, producir el agua desmineralizada necesaria para el ciclo binario de generación.

Una de las desventajas mencionadas comúnmente en la literatura acerca de los ciclos binarios de generación es la gran cantidad de agua que se emplea para enfriamiento en el condensador de la planta. Sin embargo, en este caso podrá aprovecharse la energía térmica que el agua de enfriamiento adquirirá, para desalar esa misma agua y obtener un subproducto muy valioso en el proceso de generación.

### **5.1 CONSIDERACIONES**

El análisis se hará con el agua geotérmica sobrante de los sistemas binarios que emplean evaporaciones tipo *flash*, pues son los sistemas que resultaron más eficaces en la producción de energía eléctrica, según lo visto en el capítulo anterior.

El agua de mar a desalar será la que ya ha sido empleada como agua de enfriamiento en el condensador de la planta de ciclo binario, cuya temperatura final fue de 30 °C (a la salida del condensador); y se empleará el flujo de agua geotérmica a la salida de la planta eléctrica, de 40 kg/s.

Las técnicas de desalación a analizar serán la destilación instantánea de múltiple etapa (MSF) y la destilación de múltiple efecto (MED), pues la energía a utilizar es calorífica, y tales sistemas son los que emplean una fuente de calor externa para su operación. El intercambiador de calor externo, en el caso del sistema MSF, será del tipo “placas”.

El sistema de vacío y de extracción de gases incondensables de los sistemas de destilación puede ser configurado con bombas de vacío alimentadas con parte de la energía eléctrica generada por el sistema geotermoeléctrico.

## 5.2 ANÁLISIS DE UN SISTEMA MSF

El principio de operación de este sistema es la evaporación instantánea del agua de alimentación dentro de las cámaras de evaporación, a presiones de vacío, como se explicó en el capítulo 2 del presente trabajo. El vapor generado cederá después su energía para precalentar el agua de mar en cada una de las cámaras de evaporación. En este caso, se simulará un sistema con cinco cámaras de evaporación, figura 5.1, en el que la presión mínima (presión en la última cámara) sea de 0.1 bar.

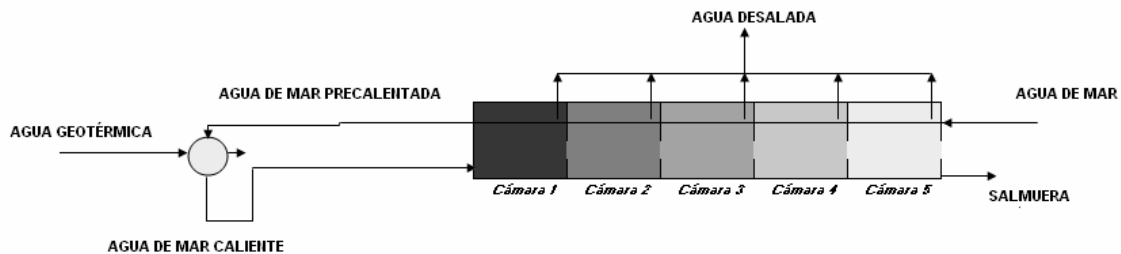


Figura 5.1 Diagrama del sistema MSF a analizar  
[El autor]

La simulación, al igual que en los sistemas de generación eléctrica, se llevará a cabo en una hoja de cálculo, en la que se introducirán las fórmulas necesarias y se podrán obtener los resultados ante distintas condiciones de entrada. Al final, se calculará la cantidad de agua que se pueda desalar con el agua sobrante de los sistemas binarios propuestos en el capítulo anterior.

Las condiciones de entrada serán las siguientes:

- Temperatura y presión iniciales del agua a desalar: 30 °C y 1 bar, respectivamente.
- Temperatura y presión iniciales del agua geotérmica: 92 °C y 2.62 bar, si el agua proviene del sistema binario con una evaporación *flash*; 78 °C y 2.62 bar, si el agua proviene del sistema con dos evaporaciones *flash*.
- El acercamiento de temperaturas entre los fluidos contenidos en el intercambiador de calor externo será de 5 °C, y la caída de presión en tal equipo será de 1 bar.
- Se considerará que, del vapor generado en las cámaras, se aprovechará el 90% de su energía para precalentar el agua de alimentación.
- La presión dentro de las cámaras variará entre 0.1 bar y la presión de saturación a la temperatura del agua de mar ya calentada por el agua geotérmica.

Para iniciar con los cálculos, se puede suponer cualquier cantidad inicial de agua de alimentación (agua a desalar), la cual requerirá de cierto flujo de agua geotérmica para ser calentada. Una vez completo el programa, se podrá establecer un flujo de agua geotérmica fijo (40 kg/s), y a partir de tal valor, con el programa se calculará la cantidad de agua a desalar que debe ser alimentada.

La temperatura del agua de mar,  $T_{AMC}$ , al ser calentada por el agua geotérmica será:

$$T_{AMC} = T_D - \Delta T_{int} \quad [5.1]$$

Donde  $T_D$  es la temperatura del agua geotérmica al salir del sistema de generación eléctrica, y  $\Delta T_{int}$  es el acercamiento de temperaturas permitido en el intercambiador externo al sistema de desalación.

Las presiones en las cámaras deberán ser menores a la presión de saturación a la temperatura  $T_{AMC}$ . El decremento de presión en las cámaras se puede obtener restando la presión mínima (0.1 bar) de la presión máxima, y dividiendo el resultado entre el número de cámaras. Al final se verá que, para precalentar el agua de alimentación en intervalos semejantes, las presiones de las cámaras se deben modificar en intervalos desiguales.

Con la presión en cada cámara, es posible obtener la temperatura y entalpías de saturación del agua que evaporará ahí dentro. El proceso entre cámara y cámara se considerará isentálpico, por lo tanto, la calidad de la mezcla vapor-agua que se forme dentro de cada etapa se podrá calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$x = \frac{h_0 - h_{fc}}{h_{gc} - h_{fc}} \quad [5.2]$$

Donde  $h_0$  representa la entalpía del agua líquida antes de entrar a la cámara, y  $h_{fc}$  y  $h_{gc}$  representan las entalpías de líquido y vapor saturado, respectivamente, a la presión de la cámara. Con esta ecuación, es posible calcular la calidad en cada una de las cámaras.

Conociendo la calidad  $x$  en la primera cámara, se puede calcular la cantidad de vapor generado ahí dentro, a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{vapor} = x\dot{m}_{aa} \quad [5.3]$$

Donde  $\dot{m}_{aa}$  es la masa de agua de alimentación.

Con la masa de vapor obtenida, y considerando que el 90% de su energía será absorbida por el agua de alimentación al precalentarse ( $\eta_{int}$ ), se puede calcular el incremento de temperatura  $\Delta T_{aa}$  que sufrirá el agua precalentada al pasar por esa cámara, a partir del siguiente balance de energía:

$$m_{vapor} (h_{g_c} - h_{f_c}) \eta_{int} = m_{aa} C p_{aa} \Delta T_{aa} \quad [5.4]$$

A partir de la salmuera resultante en la primera cámara, se calcula la masa de vapor generada en la siguiente con la ecuación 5.3 ( $m_{aa}$  será ahora la masa de salmuera entrante); y, de la misma manera que con la ecuación 5.4, se calcula el incremento de temperatura del agua precalentada en la segunda cámara. El procedimiento se repite en todas las etapas, con lo cual se obtiene la temperatura final del agua precalentada.

Ahora es posible calcular la cantidad de agua geotérmica requerida en el proceso, a partir del siguiente balance:

$$m_{ageo} C p_{ageo} (T_D - (T_{APREC} + \Delta T_{int})) \eta_{int} = m_{aa} C p_{aa} (T_{AMC} - T_{APREC}) \quad [5.4]$$

Donde el subíndice “ $APREC$ ” indica que tal propiedad corresponde al agua de mar ya precalentada.

Con todas estas ecuaciones es posible hacer que el programa realice iteraciones hasta encontrar la cantidad de agua de alimentación necesaria para ser calentada por los 40 kg/s de agua geotérmica. Y con tal valor, obtener la cantidad de agua desalada por este sistema. Asimismo, se puede ir variando la presión en cada cámara para que el agua de alimentación sea precalentada en intervalos de temperatura iguales.

En la figura 5.2 se muestra el programa elaborado para un sistema MSF que aproveche el agua sobrante del sistema binario con una evaporación *flash*, cuya temperatura es de 92 °C. La cantidad de agua desalada, en este caso, es de 8.73 toneladas por hora. En la figura 5.3 se muestra la gráfica de temperaturas del vapor y del agua precalentada en cada una de las cámaras.

Haciendo el mismo programa, pero ahora considerando el agua geotérmica sobrante del sistema binario con doble evaporación *flash*, cuya temperatura es de 78 °C, se obtiene una masa de agua desalada de 5.78 toneladas por hora<sup>16</sup>.

---

<sup>16</sup> La simulación en hoja de cálculo de tal programa se muestra en el anexo 2 del presente trabajo.

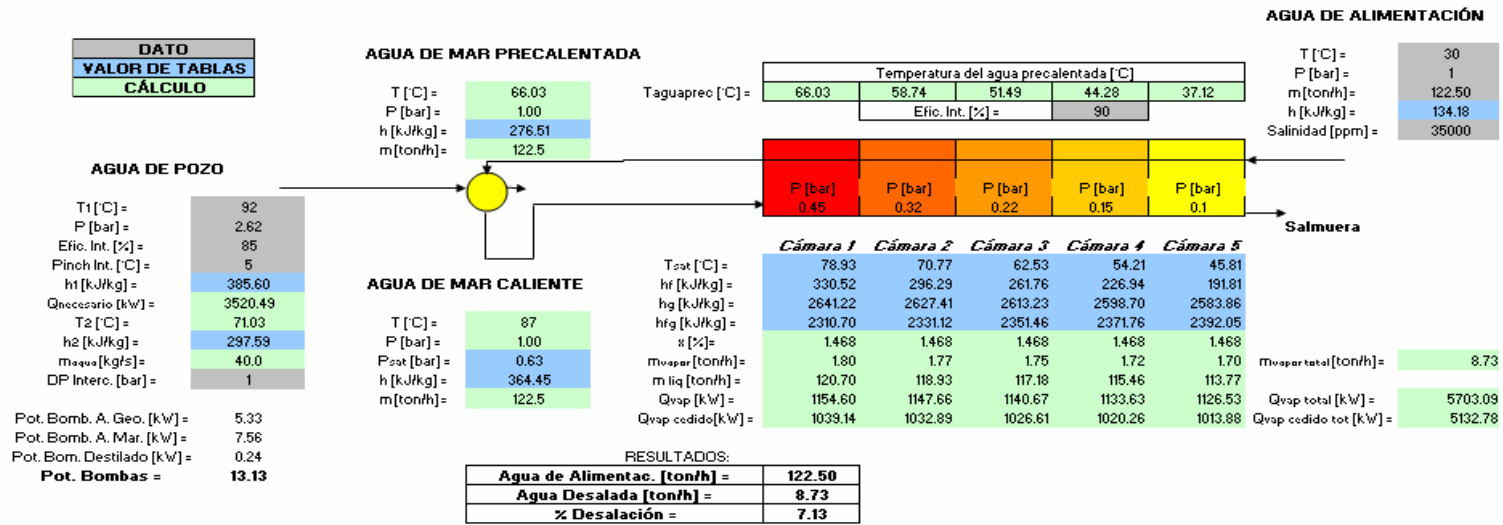


Figura 5.2 Simulación en hoja de cálculo del sistema MSF con agua geotérmica a 92 °C  
[El autor]

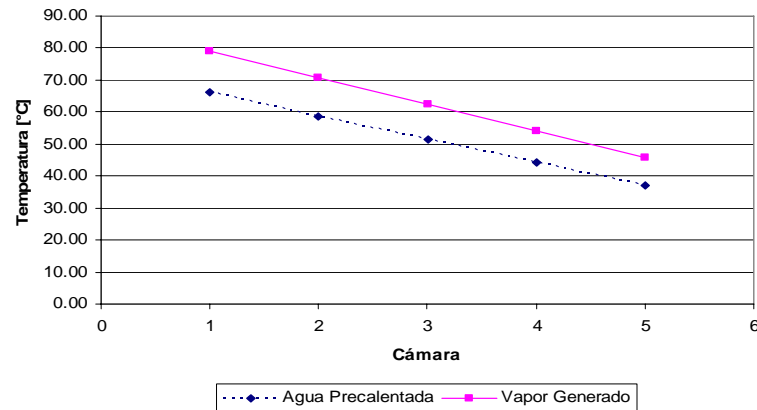


Figura 5.3 Temperatura del agua precalentada y del vapor generado dentro de las cámaras del sistema MSF  
[El autor]

En ambos casos, la cantidad de agua de mar a desalar es menor a la extraída del condensador de la planta eléctrica, por lo tanto es posible considerar que la temperatura inicial del agua de alimentación al sistema MSF sea de 30 °C.

Finalmente, en la siguiente tabla se muestran las condiciones del agua geotérmica sobrante en los dos ciclos binarios propuestos y la cantidad de agua que podría desalarse con ella, en una planta MSF como la simulada.

TABLA 5.1 Cantidad de agua desalada con el agua geotérmica sobrante de los sistemas eléctricos  
[El autor]

	<b>Sistema con una evaporación <i>flash</i></b>	<b>Sistema con doble evaporación <i>flash</i></b>
Agua Geot. [kg/s]	40	40
Temperatura [°C]	92	78
Presión [bar]	2.62	2.62
Agua Desalada [ton/h] =	8.73	5.78

Si se deseará una mayor producción de agua desalada, podría implementarse un sistema de ósmosis inversa alimentado con la energía eléctrica de la planta de ciclo binario, o modificar el sistema de destilación con el fin de hacerlo más eficiente el aprovechamiento de los recursos de baja entalpía.

Por último, se analizará un sistema MED de desalación para las mismas condiciones que las consideradas en la planta MSF simulada, con el objetivo de comparar los sistemas y determinar la mejor opción en cuanto a desalación.

### 5.3 ANÁLISIS DE UN SISTEMA MED

En este caso se analizará un sistema de destilación MED con alimentación en serie, ya que, como se explicó en el capítulo 2, con esta configuración es posible aprovechar la energía térmica de la salmuera sobrante en los efectos (cámaras); lo cual es de suma importancia si la fuente de alimentación es de baja energía.

Con el fin de comparar este sistema con el ya analizado, se considerará que las presiones dentro de los efectos serán las mismas que en las cámaras del sistema MSF, así como las demás condiciones de entrada. En la figura 5.4 se muestra la configuración del sistema a simular, se considerará el uso de un intercambiador de calor que precaliente el agua de alimentación con el vapor generado en el último efecto.

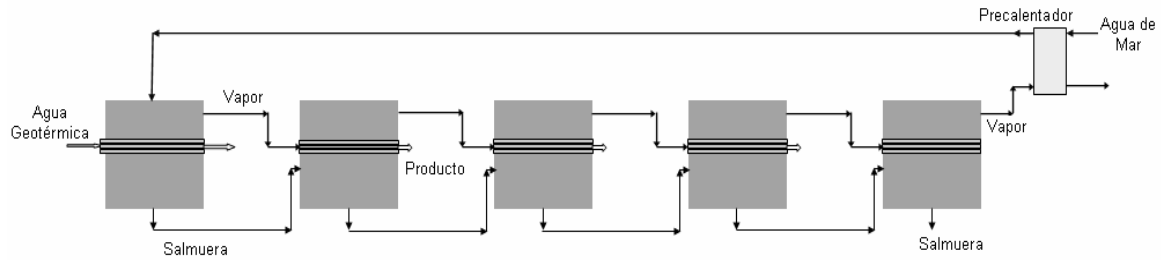


Figura 5.1 Diagrama del sistema MED a analizar  
[El autor]

En este caso, el agua geotérmica entrará al primer efecto y cederá su energía para calentar y evaporar al agua de alimentación. La energía cedida,  $q_{ageo}$ , será:

$$q_{ageo} = \dot{m}_{ageo} C_{p_{ageo}} (T_D - (T_{efecto} + \Delta T_{int})) \eta_{int} \quad [5.5]$$

Donde  $T_D$  es la temperatura del agua geotérmica antes de ceder su energía en el efecto, y  $T_{efecto}$  es la temperatura de saturación a la presión del efecto.

Para que el agua de alimentación se evapore, primero debe absorber energía hasta llegar a la temperatura de saturación. La energía  $q_1$  necesaria para tal procedimiento será:

$$q_1 = \dot{m}_{aa} (h_f - h_1) \quad [5.6]$$

Donde  $h_f$  representa la entalpía de líquido saturado a la presión del efecto, y  $h_1$  es la entalpía inicial del agua de alimentación.

Una vez calentada, parte del agua de alimentación evaporará con la energía que aún queda del agua geotérmica ( $q_{evap}$ ):

$$q_{evap} = q_{ageo} - q_1 \quad [5.7]$$

La cantidad de agua evaporada (producto) será:

$$\dot{m}_{vap} = \frac{q_{evap}}{h_g - h_f} \quad [5.8]$$

Donde  $h_g$  representa la entalpía de vapor saturado a la presión del efecto.

En la siguiente cámara, a presión menor, la salmuera resultante del primer efecto será introducida como agua de alimentación, y parte de ella evaporará instantáneamente. La masa de vapor generada en este proceso se calculará a partir de la calidad  $x$ , que a su vez, puede ser obtenida con la ecuación 5.2 vista en el sistema MSF.

Además del vapor obtenido por disminución de presión, también se obtendrá otra cantidad con la energía cedida por el vapor generado en el efecto anterior. La masa de vapor adicional se puede calcular con la ecuación 5.8, a las condiciones de presión del segundo efecto. El vapor total obtenido en la segunda cámara será igual a la suma de estas dos cantidades. Este mismo proceso se repite en los siguientes efectos.

El vapor generado en la última cámara precalienta al agua de alimentación hasta la temperatura  $T_{prec}$ , que puede ser calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{vap} (h_g - h_f) \eta_{int} = \dot{m}_{aa} C_{p_{aa}} (T_{prec} - T_{aa_1}) \quad [5.9]$$

Al introducir estas ecuaciones en la hoja de cálculo, y para las condiciones del agua geotérmica sobrante en los dos ciclos binarios propuestos, se obtienen los siguientes resultados:

TABLA 5.1 Cantidad de agua desalada con el agua geotérmica sobrante de los sistemas eléctricos  
[El autor]

	<b>Sistema con una evaporación <i>flash</i></b>	<b>Sistema con doble evaporación <i>flash</i></b>
Agua Geot. [kg/s]	40	40
Temperatura [°C]	92	78
Presión [bar]	2.62	2.62
Agua Desalada [ton/h] =	4.07	3.05

En la figura 5.2 se muestra la hoja de cálculo en la que se simuló el sistema MED a partir del agua sobrante del sistema con una evaporación *flash*.<sup>17</sup>

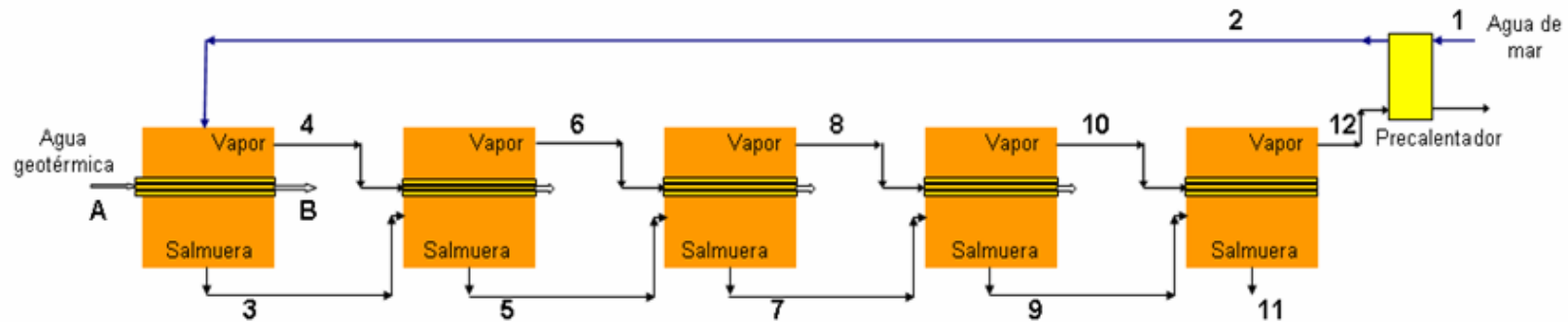
Como se observa, en este caso el agua desalada es menor que la obtenida con el sistema MSF. Esto se debe a que el agua geotérmica puede ceder mayor energía (y ser extraída a menor temperatura) en el intercambiador de calor externo al sistema MSF, lo cual no sucede en el sistema MED.

Al llevar a cabo estos análisis se puede notar que el diseño del sistema de desalación (MED o MSF) debe ser modificado para lograr una mayor eficiencia, puesto que los diseños originales han sido estructurados para emplear vapor u otra fuente de mayor energía. Tal re-configuración de los sistemas merece un estudio detallado. En este caso, sólo se discutirán los resultados obtenidos con los sistemas ya existentes.

<sup>17</sup> En el anexo 3 se muestra la simulación del sistema MED, hecha con el agua geotérmica sobrante del ciclo binario con doble evaporación *flash*.



**PLANTA MED CON ALIMENTACIÓN EN SERIE Y  
USANDO AGUA CALIENTE DE POZO COMO FUENTE DE CALOR**



Acero. Interc. [°C] =	5
Efic. Interc. [%] =	90

Punto	Agua caliente de pozo		Agua de mar											
	A	B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T [°C]	92	83.71	30	40.81	78.71	78.71	70.59	70.59	62.13	62.13	53.97	53.97	45.81	45.81
P [bar]	1	1	1	0.45	0.45	0.32	0.32	0.22	0.22	0.15	0.15	0.1	0.1	
Gasto [kg/s] =	40	40	7.056	7.056	7.00	0.06	6.84	0.15	6.60	0.24	6.29	0.31	5.93	0.37
Gasto [m3/s] =	0.0415	0.0413	0.0071	0.0071	0.0072	0.2081	0.0070	0.7591	0.0067	1.6826	0.0064	3.1042	0.0060	5.3740
Densidad [kg/m3] =	963.95	969.44	995.65	991.90	972.56	0.28	977.40	0.20	982.05	0.14	986.15	0.10	989.83	0.07
Entalpia liq [kJ/kg]	385.47	350.6	125.82	171.0	329.6		295.5		260.1		225.9		191.8	
Entalpia gas [kJ/kg]						2640.9		2627.1		2612.5		2598.3		2583.9
Carga Térmica [kW]		1253.7		1119.3		121.04		323.66		509.39		661.47		788.68

Punto	Efectos				
	E1	E2	E3	E4	E5
T [°C]	78.71	70.59	62.13	53.97	45.81
P [bar]	0.45	0.32	0.22	0.15	0.1
Entalpia liq [kJ/kg]	329.6	295.5	260.1	225.9	191.8
Entalpia gas [kJ/kg]	2640.9	2627.1	2612.5	2598.3	2583.9
Carga Térmica [kW]	134.5	121.04	323.66	509.39	661.47
Calidad (Flash) [%]		1.46	1.51	1.44	1.43
Masa Evap. Flash [kg/s]		0.102	0.103	0.095	0.090
Masa Evap. No Flash [kg/s]	0.06	0.052	0.138	0.215	0.277

PRODUCTO	
m [Kg/s] =	1.13
m [ton/h] =	4.07
%	16.00

ACOTACIONES:	
DATO	
VALOR DE TABLAS	
CÁLCULO	

Figura 5.2 Simulación en hoja de cálculo del sistema MED con agua geotérmica a 92 °C  
[El autor]

## CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 6.1.1 Generación eléctrica

Una vez elaborados los programas para generación eléctrica en las hojas de cálculo, es posible obtener las siguientes gráficas, en las que se compara al ciclo binario convencional con los dos ciclos binarios propuestos. En la figura 6.1 se puede observar que los dos ciclos binarios modificados pueden generar una mayor potencia eléctrica, y que de estos dos, el sistema con dos evaporaciones *flash* es el más eficiente. Para este ejemplo se hizo la simulación de los sistemas con un flujo de agua geotérmica a 140 °C.

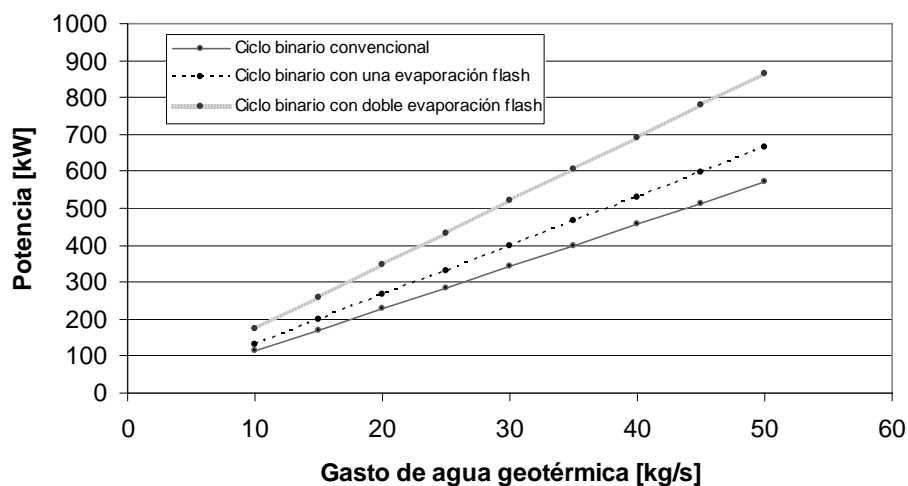


Figura 6.1 Potencia obtenida con los ciclos binarios analizados, para una temperatura de 140 °C del agua geotérmica

Si el flujo de agua geotérmica es de 50 kg/s, y empleando agua desmineralizada como fluido de trabajo, se podrían obtener más de 800 kW de potencia, como se observa en la gráfica.

Si un hogar con 4 personas consume en promedio 1.02 kW de potencia, entonces el sistema contribuiría en la electrificación de una comunidad con 3,137 personas; y si el recurso se encuentra a mayor temperatura, esta cantidad se puede incrementar.

En varias de las regiones con fuentes geotérmicas de este tipo, en la península de Baja California, hay localidades con poblaciones pequeñas, con menos de 2000 habitantes<sup>18</sup>, donde sería muy útil la instalación de pequeñas plantas eléctricas como las propuestas.

<sup>18</sup> INEGI, 2007.

Además, en los ciclos propuestos, el volumen del intercambiador de calor, en el cual el agua geotérmica cede su energía, es mucho menor que el volumen ocupado por el evaporador y precalentador de un ciclo binario convencional, como se observa en la figura 6.2. Esto hace que las propuestas sean más versátiles y puedan ser transportadas e instaladas con mayor facilidad, lo cual es indispensable en zonas rurales, donde las condiciones del camino, en la mayoría de los casos, no son favorables.

En la figura 6.2 se observa que el espacio necesario para los intercambiadores de una planta tradicional se incrementa de manera significativa conforme el gasto del recurso geotérmico aumenta, además de que su mantenimiento se hace más complicado y costoso.

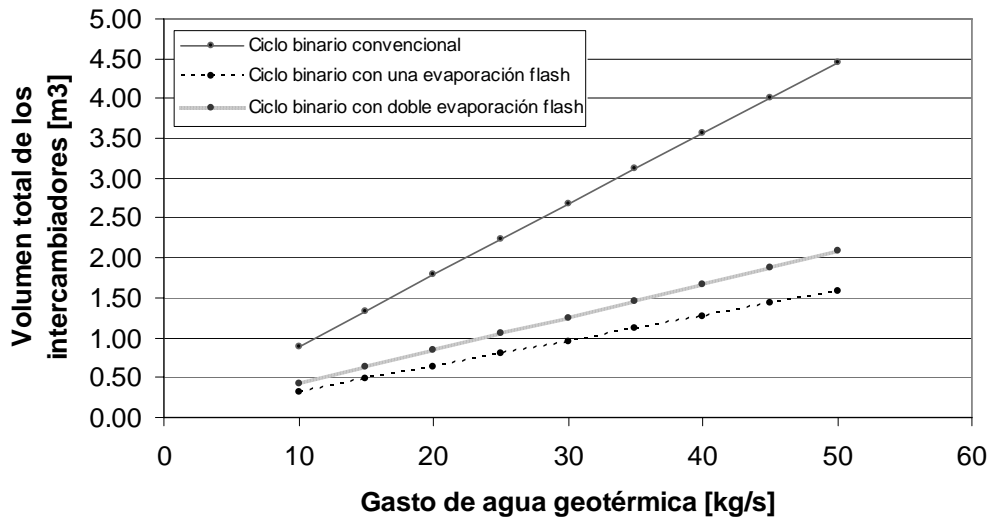


Figura 6.2 Volumen de los intercambiadores de calor de los ciclos binarios analizados

En cuanto a los costos involucrados en un proyecto geotérmico de generación eléctrica a pequeña escala, se pueden considerar los siguientes valores<sup>19</sup>:

TABLA 6.1 Costos involucrados en un proyecto geotermoeléctrico de ciclo binario

Actividad	Costo (USD)
Trabajo de exploración (geología, geofísica y geoquímica)	20,000
Perforación de un pozo delgado (500m)	50,000
Perforación del pozo de producción	100,000
Acondicionamiento del camino	50,000
Trabajo de erección	50,000
Línea de transmisión	75,000
Sistema de bombeo	40,000

<sup>19</sup> Hiriart, Mexican experience with small-scale electric power generation plants, 1999.

En el caso de emplear un flujo de agua geotérmica de 40 kg/s, en un sistema binario con dos evaporaciones *flash*, la potencia entregada sería de 693 kW. El costo de una unidad convencional de ciclo binario con condiciones semejantes, incluyendo mantenimiento, es de aproximadamente 3000 USD por kW instalado<sup>20</sup>. Considerando este mismo valor, el costo de la unidad de 693 kW sería, por lo tanto, de 2,079,000 USD.

El monto total del proyecto de 693 kW, tomando en cuenta todos los costos anteriores, sería de 2,464,000 USD. Considerando una vida útil de 20 años, con un factor de planta del 80%, y una tasa de interés del 10%, se obtiene un costo nivelado del kWh de 6 centavos de USD para la planta de ciclo binario con dos evaporaciones *flash* propuesta.

Tal valor es menor al costo del kWh producido por un generador diesel, de alrededor de 15 centavos de USD (el cual se incrementa considerablemente agregando el mantenimiento y la depreciación del motor)<sup>21</sup>. Evidentemente, los sistemas geotermoeléctricos propuestos pueden competir contra otra forma de generación eléctrica que pudiera implementarse en zonas como las estudiadas.

### 6.1.2 Desalación

De los análisis hechos para desalación, se observa que con el sistema de destilación MSF se obtiene una mayor producción de agua que con el sistema MED; logrando capacidades de 8.73 y 5.78 toneladas de agua por hora, al emplear la energía calorífica del fluido geotérmico sobrante en las plantas de ciclo binario con una y dos evaporaciones *flash*, respectivamente.

Por lo tanto, la potencia eléctrica y la cantidad de agua diaria obtenida con la combinación planta eléctrica – sistema de desalación (empleando un recurso geotérmico de 40 kg/s a 140 °C), sería:

TABLA 6.2 Potencia eléctrica y agua destilada obtenida con los ciclos binarios propuestos y un sistema MSF de desalación

Planta Eléctrica	Potencia Eléctrica [kW]	Agua Destilada [ton/día]
<i>Ciclo binario con una evaporación flash</i>	518	209.52
<i>Ciclo binario con doble evaporación flash</i>	680	138.72

<sup>20</sup> DiPippo, Small geothermal power plants, 1999.

<sup>21</sup> Hiriart, Mexican experience with small-scale electric power generation plants, 1999.

Considerando que una persona consume 100 litros diarios para satisfacer sus necesidades (la OMS recomienda que para las necesidades vitales e higiene personal se empleen 80 litros de agua diarios por persona<sup>22</sup>), entonces se podría dotar de agua potable<sup>23</sup> a 2,095 o 1,387 personas, dependiendo del ciclo binario de generación a utilizar, de una o doble evaporación *flash*, respectivamente.

Si se deseara solamente desalar agua de mar, se podría emplear toda la energía eléctrica del ciclo binario para alimentar una planta de ósmosis inversa; la cantidad de agua producida en este caso, considerando que en una planta de ósmosis inversa se requieran 4 kWh por tonelada de agua desalada, sería:

TABLA 6.3 Agua desalada obtenida en una planta de ósmosis inversa alimentada con la energía eléctrica de los sistemas binarios propuestos

Planta Eléctrica	Agua Desalada por Ósmosis Inversa [ton/día]
<i>Ciclo binario con una evaporación flash</i>	3,186
<i>Ciclo binario con doble evaporación flash</i>	4,158

Es decir, se obtendrían 4,158 toneladas de agua desalada al día, empleando un recurso geotérmico de 40 kg/s a 140 °C, a partir del ciclo binario propuesto de doble evaporación *flash*.

El precio del agua desalada, en este caso, se puede obtener a partir de los siguientes costos para plantas de ósmosis inversa de capacidad semejante<sup>24</sup>:

TABLA 6.4 Costos involucrados en una planta de ósmosis inversa

Actividad	Monto
Costo de la planta de ósmosis inversa (de 4,158 m <sup>3</sup> /día)	3,980,000 USD
Costo de las membranas (60% del costo de la planta)	2,388,000 USD
Costo anual de reemplazo de membranas (10% del costo de las membranas)	238,800 USD/año
Costo de productos químicos	0.033 USD/m <sup>3</sup>
Costo de operación	0.05 USD/m <sup>3</sup>
Consumo eléctrico	4 kWh/m <sup>3</sup>
Costo electricidad (planta eléctrica propuesta)	0.06 USD/kWh

<sup>22</sup> OMS, 2007.

<sup>23</sup> Como se vio en el capítulo 2, al agua destilada se le deben agregar ciertas sales para hacerla potable.

<sup>24</sup> El-Dessouky y Ettouney, Fundamentals of salt water desalination, 2002.

Con estos valores, y suponiendo una vida útil de la planta desaladora de 20 años, una tasa de interés del 10% y una disponibilidad del 90%, se obtiene un costo total de 1.05 USD por m<sup>3</sup> de agua desalada. Tal valor resulta económico, comparado con los costos comunes de plantas pequeñas de ósmosis inversa, como se puede observar en la sección 2.3.3 del presente trabajo.

## 6.2 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se propuso el aprovechamiento de los recursos geotérmicos localizados en varias zonas de la república para generación eléctrica a pequeña escala y desalación de agua de mar. Se simuló en una hoja de cálculo un ciclo binario común de generación eléctrica y dos ciclos binarios modificados, propuestos para incrementar la potencia eléctrica generada. Asimismo, se simularon dos sistemas térmicos de desalación, también en una hoja de cálculo, con los cuales se podría emplear la energía calorífica sobrante en el proceso de generación de electricidad para desalar agua de mar.

Las conclusiones a las que se llega después de elaboradas tales simulaciones y análisis son las siguientes:

- El uso de la energía geotérmica para producción de electricidad y otras aplicaciones es una alternativa eficaz que puede contribuir en la solución de los problemas energéticos y de contaminación, pues sus recursos son inmensos y muy versátiles.
- Los recursos geotérmicos de temperaturas bajas representan un enorme potencial energético que puede solventar las necesidades de electricidad y agua en varias regiones del país, y contribuir en la distribución de estos mismos servicios en las comunidades que ya cuentan con ellos.
- Con los sistemas propuestos de generación eléctrica (ciclos binarios con una o dos evaporaciones *flash*) es posible obtener hasta un 30% más de potencia eléctrica que en un ciclo binario convencional, para las mismas condiciones del fluido geotérmico. Un proyecto geotermoeléctrico en el cual se empleen los ciclos propuestos proporcionaría energía eléctrica a precios competitivos, con la ventaja de emplear recursos alternos a los fósiles y disminuir la emisión de contaminantes.

- Al reducir el tamaño de los equipos necesarios para la planta geotermoeléctrica (como sucede en los ciclos binarios propuestos), es posible lograr la instalación del sistema en un mayor número de localidades, pues su tamaño compacto permite su transporte en zonas de difícil acceso.
- El agua geotérmica sobrante en los ciclos de generación eléctrica propuestos se puede emplear en un sistema térmico de desalación, con lo cual es posible obtener agua destilada como subproducto. En el caso de requerir agua potable, el agua destilada puede ser posteriormente tratada y potabilizada, o bien, se puede acoplar una planta de ósmosis inversa al sistema de generación eléctrica, con lo cual se lograrían mayores producciones de agua potable a costos corrientes.
- Dependiendo de las necesidades halladas para una población en particular, con los sistemas analizados de generación eléctrica y desalación es posible dotarla de sólo energía eléctrica, sólo agua potable, o una combinación de ambos servicios.

Para continuar con el trabajo, es necesario llevar a cabo un estudio más detallado de las zonas en las que se han detectado manifestaciones geotérmicas, con el fin de obtener datos más precisos sobre el reservorio, y en base a ello hacer nuevamente las simulaciones e incluir otros factores que intervengan en el proceso de generación eléctrica y desalación (como composición química del agua, presiones reales, cantidad de gases disueltos, profundidad del acuífero, etc.).

También es conveniente construir prototipos para los sistemas eléctricos propuestos, diseñar los equipos necesarios y hacerles pruebas de laboratorio, con el objetivo de observar y caracterizar su desempeño ante distintas condiciones. Además, se debe desarrollar un análisis económico más preciso sobre las propuestas y verificar su viabilidad.

## ANEXOS

### ANEXO 1. CÁLCULO DEL ÁREA DE INTERCAMBIO Y VOLUMEN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

Para calcular la superficie de intercambio, y con ella el volumen total de un intercambiador de calor, se puede recurrir al método de la temperatura media logarítmica (LMTD, por sus siglas en inglés). De esta manera es posible relacionar el calor transferido, o carga térmica, con la diferencia de temperaturas entre los fluidos que intercambian energía, en función del coeficiente global de transferencia de calor,  $U$ , y el área de intercambio, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$q = UA\Delta T_m \quad [A.1]$$

Donde  $A$  representa el área de intercambio,  $q$  la carga térmica del intercambiador, y  $\Delta T_m$  la diferencia de temperaturas media logarítmica, cuyo valor depende de la diferencia de temperaturas entre los fluidos a la entrada y salida del intercambiador:

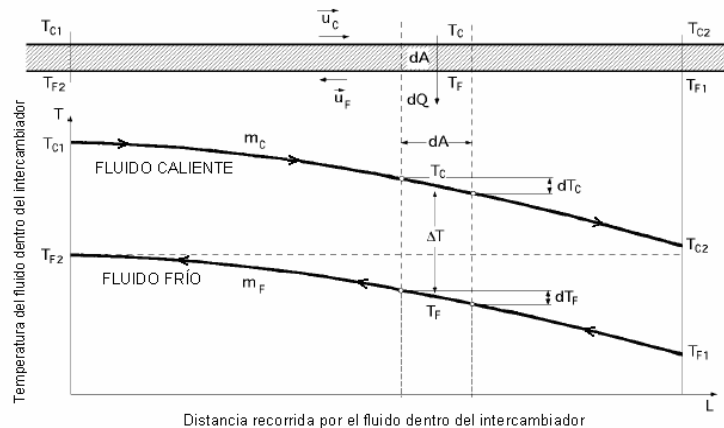
$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad [A.2]$$

En el caso de un intercambiador con flujo en contracorriente, cuya distribución de temperaturas se puede observar en la figura A.1, los valores de  $\Delta T_1$  y  $\Delta T_2$  serán:

$$\Delta T_1 = T_{C1} - T_{F2} \quad [A.3]$$

$$\Delta T_2 = T_{C2} - T_{F1} \quad [A.4]$$

Los subíndices “C” y “F” corresponden a los fluidos caliente y frío, y los subíndices “1” y “2” a las secciones de entrada y salida del intercambiador, respectivamente.



*Figura A.1 Temperatura de los fluidos en relación a su posición dentro de un intercambiador con flujo en contracorriente*  
[Ingeniería Energética, 2002]



En los intercambiadores de placas, es posible que la diferencia de temperaturas entre los fluidos de un extremo del intercambiador sea la misma que la del otro extremo<sup>25</sup>, como se observa en la siguiente figura. Si esto sucede, la ecuación A.2 se indeterminaría; por ello, en este tipo de intercambiadores se puede emplear la diferencia de temperaturas media aritmética ( $\Delta T_a$ ), en lugar de la logarítmica, para calcular la superficie de transferencia.

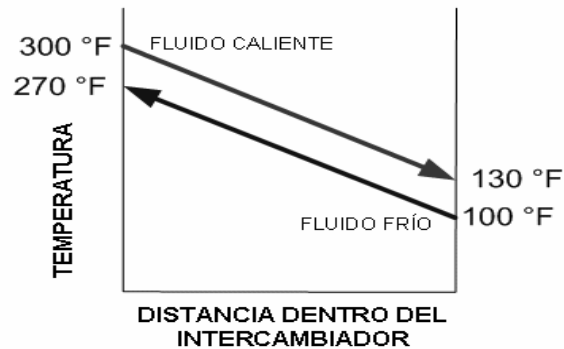


Figura A.2 Temperatura de los fluidos en relación a su posición dentro de un intercambiador de placas, con flujo en contracorriente [Alfa Laval, 2007]

El valor de  $\Delta T_a$  se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\Delta T_a = \frac{T_{C2} + T_{C1}}{2} - \frac{T_{F2} + T_{F1}}{2} \quad [A.5]$$

A partir de los análisis hechos en el capítulo 4 del presente trabajo, es posible determinar las temperaturas de entrada y salida de los dos fluidos dentro del intercambiador, así como su carga térmica  $q$ . Con tales valores, y conociendo el coeficiente  $U$ , se puede calcular el área de intercambio necesaria para la transferencia de calor.

En este caso, los valores de  $U$  considerados para el cálculo de las áreas fueron<sup>26</sup>:

- Para el intercambiador de carcasa y tubos (en el sistema binario con evaporador):

$$U = 1200 \text{ [W/m}^2\text{°C]}$$

- Para el intercambiador de placas (en el sistema binario con evaporación flash):

$$U = 4000 \text{ [W/m}^2\text{°C]}$$

<sup>25</sup> Alfa Laval, 2007.

<sup>26</sup> The Engineering Tool Box, 2007.

Una vez calculada el área de intercambio, es posible determinar el volumen total del intercambiador, en base a la relación área/volumen proporcionada por los fabricantes. En los análisis hechos, los valores considerados fueron los siguientes<sup>27</sup>:

- Para el intercambiador de carcasa y tubos:

$$A/V = 70 \text{ [m}^2\text{/m}^3\text{]}$$

- Para el intercambiador de placas:

$$A/V = 300 \text{ [m}^2\text{/m}^3\text{]}$$

---

<sup>27</sup> Alfa Laval, 2007.

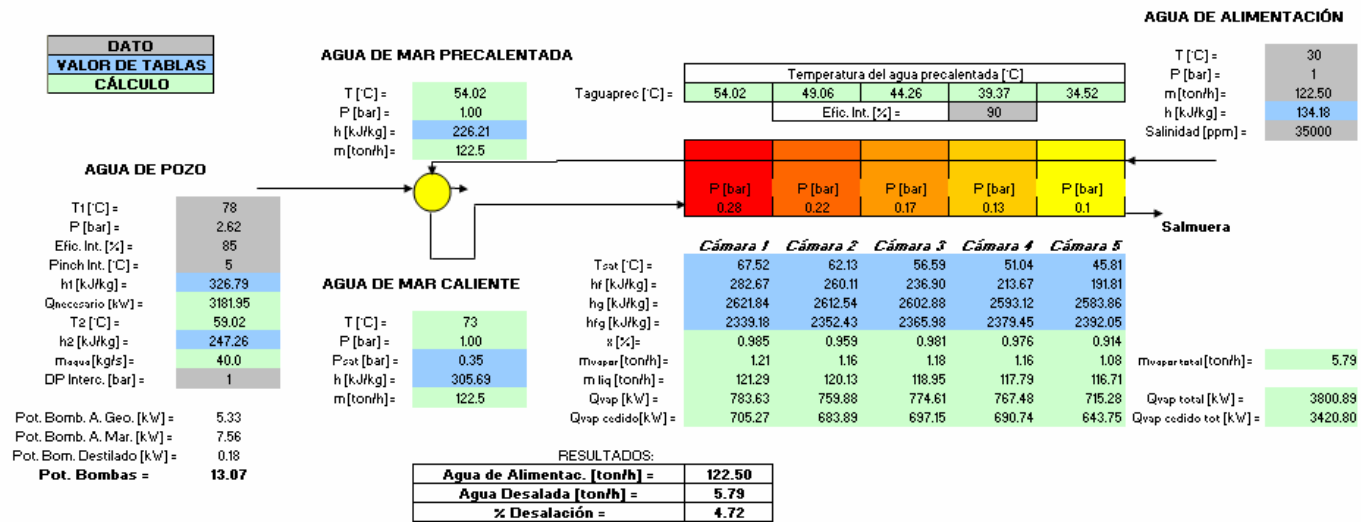


Figura A.3 Simulación en hoja de cálculo del sistema MSF con agua geotérmica a 78 °C [El autor]

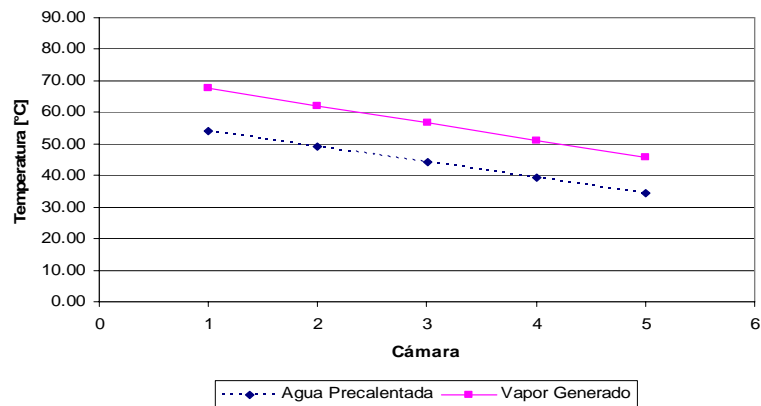
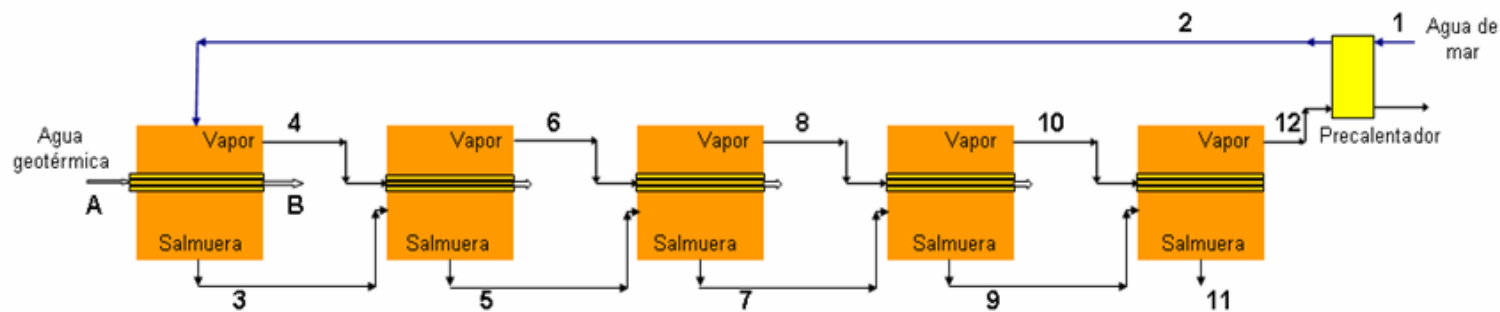


Figura 4.14 Temperatura del agua precalentada y del vapor generado dentro de las cámaras del sistema MSF [El autor]

**PLANTA MED CON ALIMENTACIÓN EN SERIE Y  
USANDO AGUA CALIENTE DE POZO COMO FUENTE DE CALOR**



Acerc. Interc. [°C] =	5
Efic. Interc. [%] =	90

Punto	Agua caliente de pozo		Agua de mar											
	A	B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T [°C]	78	72.52	30	40.81	67.52	67.52	62.13	62.13	56.59	56.59	51.04	51.04	45.81	45.81
P [bar]	1	1	1	1	0.28	0.28	0.22	0.22	0.17	0.17	0.13	0.13	0.1	0.1
Gasto [kg/s] =	40	40	5.29	5.29	5.19	0.10	5.05	0.14	4.87	0.18	4.67	0.20	4.44	0.23
Gasto [m3/s] =	0.0411	0.0410	0.0053	0.0053	0.0053	0.5646	0.0051	0.9814	0.0049	1.5599	0.0047	2.3414	0.0045	3.3087
Densidad [kg/m3] =	973.03	976.31	995.65	991.90	979.13	0.18	982.05	0.14	984.88	0.11	987.52	0.09	989.83	0.07
Entalpia Lic [kJ/kg]	326.66	303.7	125.82	171.0	282.7		260.1		236.9		213.7		191.8	
Entalpia gas [kJ/kg]						2621.8		2612.5		2602.9		2593.1		2583.9
Carga Térmica [kW]		827.5		590.8		213.10		297.12		372.87		437.46		485.58

Punto	Efectos				
	E1	E2	E3	E4	E5
T [°C]	67.52	62.13	56.59	51.04	45.81
P [bar]	0.28	0.22	0.17	0.13	0.1
Entalpia Lic [kJ/kg]	282.7	260.1	236.9	213.7	191.8
Entalpia gas [kJ/kg]	2621.8	2612.5	2602.9	2593.1	2583.9
Carga Térmica [kW]	236.8	213.10	297.12	372.87	437.46
Calidad (Flash) [%]		0.96	0.98	0.98	0.91
Masa Evap. Flash [kg/s]		0.050	0.050	0.048	0.043
Masa Evap. No Flash [kg/s]	0.10	0.091	0.126	0.157	0.183

PRODUCTO	
m [Kg/s] =	0.85
m [ton/h] =	3.05
%	16.00

ACOTACIONES:	
DATO	
VALOR DE TABLAS	
CÁLCULO	

Figura A.4 Simulación en hoja de cálculo del sistema MED con agua geotérmica a 78 °C

[El autor]

## GLOSARIO

Condensador de contacto:	<i>Condensador en el cual los fluidos que intercambian energía entran en contacto directo y, en consecuencia, se obtiene sólo un flujo (mezcla) a la salida del condensador.</i>
Condensador de superficie:	<i>Condensador en el que los fluidos contenidos no se mezclan, y los cuales permanecen separados por una pared (tubular, en el caso de condensadores de carcasa y tubos).</i>
Fluido de trabajo:	<i>Sustancia empleada para transportar la energía calorífica de una fuente de calor y transformarla en energía mecánica.</i>
GWh:	<i>Gigawatt-hora</i>
IGA:	<i>International Geothermal Association</i>
INEGI:	<i>Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática</i>
MWh:	<i>Megawatt-hora</i>
MW <sub>t</sub> :	<i>Megawatt térmico</i>
OMS:	<i>Organización Mundial de la Salud</i>
USD:	<i>Dólar estadounidense</i>

## REFERENCIAS

### BIBLIOGRÁFICAS:

- Armstead, HCH (1989), *Energía geotérmica*, Limusa, México, DF, 504 pp
- Axelsson, G y Gunnlaugsson, E (2000), Background: geothermal utilization, management and monitoring, *Long-term monitoring of high and low enthalpy fields under exploitation*, WGC 2000 Short Courses, Japón, 3-10
- Buross, OK (2000), *The ABC's of desalting*, 2ª ed, International Desalination Association, Topsfield, Massachusetts, EUA, 30 pp
- DiPippo, R (1980), Geothermal energy as a source of electricity: a worldwide survey of the design and operation of geothermal power plants, U.S. Gov. Printing Office, Washington, DC, EUA, 370 pp
- DiPippo, R (1999), Small geothermal power plants; en *Small-scale electric power generation and geothermal heat pumps*, Popovski, K, Lund, JW, Gibson, DJ y Boyd, TL (editores), Oregon Institute of Technology, Klamath Falls, Oregon, EUA, 1-11
- El-Dessouky, HT y Ettouney, HM (2002), *Fundamentals of salt water desalination*, Elsevier, Ámsterdam, Países Bajos, 670 pp
- Espíndola, S (2006), Viabilidad económica de proyectos geotermoeléctricos, un enfoque integral, tesis de licenciatura, *Facultad de Ingeniería, UNAM*, México, DF, 96 pp
- Fuentes Díaz, M (2007), La desalación del agua, **Gaceta del IMTA**, 6, 4-8
- Garduño, H (2003), Administración de derechos del agua. Experiencias, asuntos relevantes y lineamientos, FAO, Roma, Italia, 38 pp
- Hiriart, G (1999), Mexican experience with small-scale electric power generation plants; en *Small-scale electric power generation and geothermal heat pumps*, Popovski, K, Lund, JW, Gibson, DJ y Boyd, TL (editores), Oregon Institute of Technology, Klamath Falls, Oregon, EUA, 125-137
- Khan, AH (1986), *Desalination Processes and Multistage Flash Distillation Practice*, Elsevier, Nueva York, EUA, 596 pp

- López Sánchez, A, Bíncora Alsina, C, Prol Ledesma, RM, Hiriart, G (2006), A New Geothermal Resource in Los Cabos, Baja California Sur, Mexico, *Instituto de Geofísica, UNAM, Instituto de Ingeniería, UNAM*, Proceedings 28th NZ Geothermal Workshop, Auckland, Nueva Zelanda, 5 pp
- Medina San Juan, JA (2000), Desalinización de aguas salobres y de mar. Ósmosis Inversa, Mundi-Prensa, Madrid, España, 396 pp
- Muffler, P y Cataldi, R (1978), Methods for regional assessment of geothermal resources, *Geothermics*, **7**, 53-89
- Nicholson, K (1993), *Geothermal Fluids*, Springer Verlag, Berlin, Alemania, 264 pp
- Prol Ledesma, RM, Canet, C, Torres Vera, MA, Forrest, MJ, Armienta, MA, (2004), Vent Fluid Chemistry in Bahía Concepción coastal submarine hydrothermal system, Baja California Sur, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **137**, 311-328
- White, DE (1973), Characteristics of geothermal resources; en *Geothermal Energy*, Kruger, P y Otte, C (editores), Stanford University Press, Standforf, EUA, 69-94

DE INTERNET:

- Alfa Laval: [www.alfalaval.com](http://www.alfalaval.com)
- Barber-Nichols: [www.barber-nichols.com](http://www.barber-nichols.com)
- BP Statistical Review of World Energy 2007:  
[http://www.bp.com/liveassets/bp\\_internet/globalbp/globalbp\\_uk\\_english/reports\\_and\\_publications/statistical\\_energy\\_review\\_2007](http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2007)
- California Coastal Comission: <http://www.coastal.ca.gov/index.html>
- Comisión Federal de Electricidad: <http://www.cfe.gob.mx>
- Comisión Nacional del Agua: <http://www.cna.gob.mx>
- Engineering ToolBox: [www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com)

- INEGI: [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)
- Ingeniería Energética: <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/index.html>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: <http://www.imta.gob.mx>
- International Geothermal Association: <http://iga.igg.cnr.it/index.php>
- Organización Mundial de la Salud: <http://www.who.int/es/index.html>
- Sandia National Laboratories: <http://www.sandia.gov>