



24
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL VAPOR DE
LA SALMUERA EN CICLOS GEOTERMOELÉCTRICOS
MEDIANTE CONCENTRADORES SOLARES**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO
P R E S E N T A:
ARTURO SÁEZ MONROY

DIRECTOR DE TESIS: M.I. ÁLVARO EDUARDO LENTZ HERRERA
CODIRECTOR: DR. RAFAEL ALMANZA SALGADO

ENERO DE 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

DEDICATORIAS

ANTES QUE NADA QUIERO DEDICAR ESTE
TRABAJO A MI PADRE **JESUCRISTO**. SEÑOR
POR QUE GRACIAS A TI HE PODIDO DAR ESTE
PASO EN MI VIDA, Y TE LO OFRESCO.

A MIS QUERIDOS PADRES **PILAR Y EDUARDO**:
PORQUE GRACIAS A SU AMOR, TRABAJO, VIRTUDES
PACIENCIA Y SOPORTE HE ALCANZADO ESTE GRAN LOGRO,
PARA USTEDES QUE SIEMPRE SOÑARON EN
ALGO COMO ESTO, CON MUCHA GRATITUD ADMIRACIÓN
Y CARIÑO.

A MIS QUERIDAS ABUELITAS **CONCEPCIÓN E ISaura**:
POR QUE SU VIDA SIEMPRE LLENA DE TRABAJO,
DEDICACIÓN, EMPEÑO, HONESTIDAD, Y AMOR, HAN
SIDO EJEMPLO PARA MI, CON AMOR PARA USTEDES.

FINALMENTE A MIS HERMANOS **LALO Y CORAL**:
PORQUE HAN SIDO USTEDES QUIENES HAN
AGUANTADO MI CARÁCTER Y ERRORES, HAN
SIDO UN SOPORTE MUY VALIOSO, CON CARIÑO
PARA USTEDES.

ARTURO.

AGRADECIMIENTOS:

- En primer lugar quisiera agradecer a mi alma mater, mi querida Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme brindado la oportunidad de recibir la formación profesional a través de sus profesores.
- Quisiera agradecer en especial al doctor Rafael Almanza Salgado, quien me permitió realizar este trabajo y me brindo las facilidades, así como su amistad para poder llevarlo a cabo y formar parte de su equipo de trabajo.
- Un agradecimiento particular para el MI. Álvaro E. Lentz H. y de igual forma al MI. Vicente Flores por su apoyo, consejo y amistad que me otorgaron durante la realización y revisión de este trabajo.
- Agradezco al Instituto de Ingeniería por las facilidades prestadas para la realización de esta tesis, así como por la oportunidad de me dio de ser becario durante el desarrollo de este trabajo.
- De igual forma agradezco a CFE por haber proporcionado datos técnicos por medio del Ing. Serafin López para la realización de este trabajo.
- Mis agradecimientos a el Ing. Armando Sánchez G. por su apoyo, recomendaciones y amistad durante la realización de este trabajo y principalmente durante la construcción del calorímetro.
- Al Sr. Ceferino Figueroa F. por su apreciable apoyo en los trabajos realizados en la Planta solar.
- Finalmente quisiera agradecer a todos los profesores que formaron parte de mi vida académica y en especial a aquellos que lograron dejarme algún conocimiento.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1.- ANTECEDENTES	4
1.1 Condiciones actuales en México	4
1.2 Geotermia y clasificación de campos térmicos	9
1.3 Importancia de la calidad en campos geotérmicos	11
1.4 Objetivos del trabajo de tesis	13
2.- ENERGÍA SOLAR	14
2.1 Energía solar	14
2.1.1 Concentradores	15
2.1.2 Concentradores estacionarios	17
2.1.3 Concentradores con seguimiento continuo	18
2.1.4 Concentradores con curvatura sencilla	18
2.1.5 Concentradores con curvatura compuesta	21
2.1.6 Sistema de torre central	21
2.2 Aplicaciones actuales de plantas solares	23
2.2.1 Especificaciones para ensambles de concentradores de canal parabólico LS – 2	25
3.- PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LA SALMUERA Y CICLOS DE GEOTERMIA	
3.1 Termodinámica de la salmuera	27
3.2 Potencial energético de fluidos geotérmicos	27
3.3 Eficiencias en plantas geotermoeléctricas	31
3.4 Ciclos de geotermia	35
3.4.1 Ciclo de condensación indirecta	35
3.4.2 Ciclo directo	36
3.4.3 Ciclo de condensación	37
3.4.4 Ciclo de estrangulamiento simple	37
3.4.5 Ciclo de estrangulamiento doble	38
3.4.6 Ciclo de fluido binario	39
3.4.7 Ciclo de agua subatmosférica	40
3.5 Campo geotérmico de Cerro Prieto	40
4.- CONFIGURACIONES PROPUESTAS DEL SISTEMA HÍBRIDO SOLAR – GEOTÉRMICO	44
4.1 Caso actual	44
4.2 Configuración con concentradores después del separador	46
4.3 Configuración con concentradores antes del separador	47
4.4 Configuración con concentradores antes del separador tres turbinas	48
4.5 Configuración con concentradores para una sola turbina	49
4.6 Cuadro comparativo de las configuraciones propuestas	50

5.- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CALORÍMERTO	53	
5.1 Calidad	53	
5.1.1 Calidad del vapor	54	
5.2 Calorímetros	55	
5.2.1 Calorímetro de estrangulamiento	56	
5.2.2 Calorímetro eléctrico	57	
5.2.3 Calorímetro de separación	57	
5.2.4 Calorímetro de barril	58	
5.3 Diseño del equipo de medición de calidad de vapor	59	
5.3.1 Condiciones que debe cumplir el calorímetro	59	
5.3.2 Tabla de decisiones	61	
5.3.3 Diseño del calorímetro	62	
5.4 Construcción del calorímetro	63	
6.- PRUEBAS EXPERIMENTALES DE MEDICIÓN DE CALIDAD Y CONFIGURACIÓN RECOMENDADA PARA EL SISTEMA HÍBRIDO	66	
6.1 Medición de calidad de vapor de agua	66	
6.1.1 Proceso para la medición de la calidad	66	
6.1.2 Observaciones y resultados de la medición	68	
6.1.2.1 Para vapor obtenido a partir de agua	68	
6.1.2.2 Para vapor obtenido a partir de salmuera	71	
6.2 Configuración óptima del sistema hibrido solar – geotérmico	73	
7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75	
APÉNDICE A	RELACIÓN AGUA VAPOR EN CERRO PRIETO	79
APÉNDICE B	PLANOS DEL CALORÍMETRO	83
APÉNDICE C	RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES	90
REFERENCIAS		102

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica se ha convertido en nuestros días en una necesidad básica para el ser humano. Debido a los adelantos tecnológicos, a la globalización, y al estilo de vida de nuestros días no podemos prescindir de este energético. Actividades tan fundamentales como beber agua o preparar los alimentos no podrían realizarse si se carece de la energía eléctrica, pensemos en el caso de ciudades que no pueden prescindir del acondicionamiento de clima para poder sentirse en un ambiente confortable. En caso de que se sufriera una crisis de energía eléctrica, los mayormente afectados serían en primer lugar las empresas quienes provocarían que el problema creciera de tal manera que se volvería un problema económico de los que ya son bien conocidos por todos nosotros.

Lo anterior es pensando que se sufriera una crisis repentina de energía eléctrica. Pero, ¿qué ocurre con el desarrollo de plantas de generación de energía eléctrica en nuestro país?, ¿No hay Ingenieros que puedan diseñar procesos para la conversión de energía y obtener electricidad?; Si la demanda crece, ¿Qué se hace para satisfacerla?; continúa la discusión de que las empresas paraestatales que tienen el monopolio de energía eléctrica ¿Son de todos los mexicanos?; ¿Quién realmente se está beneficiando con estas empresas?, ¿Se está pagando lo justo por la energía eléctrica?, y ¿el subsidio está bien aprovechado, o desperdiciamos mucha energía eléctrica?.

Todas estas preguntas son en principio la motivación para realizar este trabajo, y principalmente los diversos procesos para realizar la conversión de energía.

Es necesario conocer el panorama de nuestro país, cuales son los retos y problemas que se tienen que afrontar, tomando en cuenta que el problema energético es a nivel mundial, y que incluso los países más poderosos como Estados Unidos tienen el mismo problema.

Por otra parte no se ha puesto mucha atención a las fuentes naturales de energía que se encuentran en el seno de la tierra, las cuales son bien conocidas por todos, pero muy pocas son las personas convencidas de que el Sol es realmente la principal fuente de energía. Quemamos carbón, madera o productos petrolíferos, sin pensar en que todos estos combustibles tienen su origen en la energía solar. En tan sólo 100 años ha sido consumida ya la mayor parte de la reserva conocida de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural), cuya formación como materias vegetales y ulterior transformación y almacenamiento data de cientos de millones de años [Hans Rau, 1984].

Incluso los saltos de agua, deben su existencia a la energía solar, puesto que en el circuito natural de evaporación que depende indudablemente de los efectos de la radiación solar, llega el agua a lugares de mayor altura de la Tierra, desde los que, a través de arroyos y ríos, llega a las centrales eléctricas, de las que nuestras máquinas reciben la corriente necesaria.

La tierra recibe anualmente del Sol una cantidad de energía de unos 7×10^{17} kWh. Sin embargo, con sus centrales eléctricas y otras instalaciones el hombre sólo puede generar por año 4×10^{13} kWh [Hans Rau, 1984]. Esta es precisamente la energía que no cuesta un solo centavo y que podemos aprovechar para muchas aplicaciones: generación de energía eléctrica, calefacción de viviendas, producción y acumulación de agua caliente, extracción de sal de los océanos, desalinización de agua salada, accionamiento de equipos, acondicionadores de aire, así como para cocinar alimentos, fundir productos cerámicos y otras muchas aplicaciones que hasta ahora requieren un consumo de combustible. Resulta entonces rentable aprovechar la energía que nos ofrece el Sol. El carbón mineral es demasiado valioso para ser quemado, pues contiene, al igual que el petróleo sustancias que son indispensables para las industrias químicas y de plásticos.

Este trabajo es el inicio de una propuesta que pretende establecer la unión de dos fuentes renovables (geotermia – solar) para aumentar la capacidad instalada de una planta geotérmica. Está dividido en seis capítulos, en el primero se encuentran algunos antecedentes referidos a la capacidad de generación que tiene nuestro país en general, y la importancia de la calidad de vapor en los ciclos de geotermia con referencia a la capacidad de dicha planta

En el segundo capítulo se hace una breve descripción de los tipos de concentradores solares, sus características, así como la descripción de algunas aplicaciones industriales que están operando actualmente con concentradores de tipo canal parabólico.

En el tercer capítulo se hace una breve descripción de las propiedades termodinámicas de la salmuera y su relación con la concentración de Cloruro de Sodio contenido en el agua. Se hace también una breve descripción de los ciclos de geotermia y finalmente, se establecen las condiciones bajo las que operan estas plantas y en especial la planta de Cerro Prieto en Baja California Norte.

En el cuarto capítulo se muestran diversas propuestas con un enfoque termodinámico para hacer uso de concentradores solares de canal parabólico en instalaciones de geotermia, enfocado directamente a los campos de geotermia de Cerro Prieto, así como diversos parámetros de comparación para poder evaluar la aplicación tecnológica de estos enfocados hacia la generación directa de vapor.

En el quinto capítulo se hace un estudio de la calidad del vapor y de los equipos de medición de calidad del vapor, así como, la descripción del equipo construido y fabricado para realizar las pruebas de medición de calidad del vapor de agua y de salmuera realizadas en la planta solar del Instituto de Ingeniería.

En el sexto capítulo se muestran los resultados de las pruebas realizadas en la medición de la calidad del vapor y se establece la configuración óptima para el sistema híbrido de concentradores solares de canal parabólico y geotermia.

En el séptimo capítulo se pueden observar las conclusiones, y recomendaciones realizadas acerca de este proyecto, y finalmente se presentan diversos apéndices con información referente a algunos capítulos.

1.- ANTECEDENTES

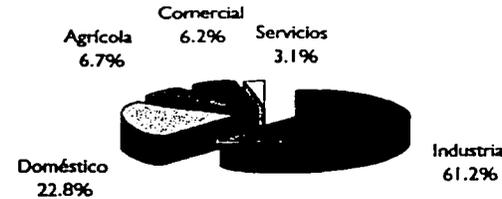
Para empezar a desarrollar un proyecto energético de deben conocer las condiciones en las que se encuentra el lugar a estudio, como este proyecto está referido a una aplicación en México, se muestra a continuación un panorama general acerca de las condiciones de capacidad instalada y demanda energética y sus diversos tipos de energéticos que se usan. Veamos entonces un panorama breve de las condiciones energéticas.

1.1 CONDICIONES ACTUALES EN MÉXICO

El crecimiento en la demanda de energía eléctrica en países industrializados es menor que el 1.5% anual, para nuestro caso, que nos encontramos con los países en vías de desarrollo el crecimiento en la demanda es mayor al 4.3% , lo cual demuestra que la demanda mayor de energía eléctrica esta en el uso doméstico, es decir debido a una tasa de crecimiento demográfico tan alta la energía se usa para consumo y no para producción que sería el caso de uso industrial [Secretaria de Energía, 2000]. Es esta una de las causas por las que el reto de México es que la tasa de crecimiento económico sea mayor que la tasa de crecimiento demográfico. Esto se observa en los datos reportados por CFE (fig. 1.1) durante 1999 el 0.46% de usuarios son del ramo Industrial y demandaron el 60.2% de la energía eléctrica producida, para el caso de uso Domestico representan el 88.3% y demandaron el 23%. Solo estos dos ramos demandan mas del 80% de la energía generada por el país, además presentan una tasa de crecimiento de demanda de 5.7% y 5.9% respectivamente [CFE, 2000].

A quién le servimos

• 18.4 millones de usuarios.



Porcentaje de ventas directas al público enero-agosto 2000

Fig. 1.1 Porcentaje de usuarios de CFE por sector.

Obsérvese que son muy pocas empresas y que demandan gran parte de la energía producida, para el caso de que se tenga una tasa de crecimiento industrial mayor, en el país la capacidad instalada no es suficiente para poder satisfacer las necesidades de el sector industrial, lo cual representa un limitante para poder atraer sector industrial privado al país.

El país está dividido por zonas (fig 1.2) para su mejor administración, esto ayuda a identificar problemas y dar soluciones a las diversas necesidades de cada región, se ha observado que las zonas de mayor capacidad son (cuadro 1.1): la Occidental, Central, Noreste y Oriental como se puede observar en los gráficos que a continuación se muestran.

Áreas del Sistema Eléctrico Nacional



Figura 1.2 Áreas del sector eléctrico nacional [Secretaría de Energía México, 2000].

Capacidad efectiva por área a diciembre de 1999 (MW)

Área	Hidro-eléctrica	Térmica Convencional	Ciclo Combinado	Turbogás	Combustión Interna	Dual	Carbo-eléctrica	Geotérmica y eólica	Nucleo-eléctrica	Total
Noroeste	941	2,162	0	273	0	0	0	0	0	3376
Norte	28	1074	722	253	0	0	0	0	0	2077
Noreste	118	1715	378	455	0	0	2600	0	0	5266
Occidental	1798	3466	218	122	0	2100	0	88	0	7792
Central	1524	2474	482	374	0	0	0	0	0	4854
Oriental	5210	2217	452	43	0	0	0	44	1368	9334
Peninsular	0	442	212	387	1	0	0	0	0	1042
Baja California	0	620	0	327	2	0	0	620	0	1569
Baja California Sur	0	113	0	126	75	0	0	0	0	314
Zonas Aisladas	0	0	0	5	39	0	0	1	0	45

1 La capacidad hidroeléctrica corresponde a los niveles de diseño de los embalses, durante el estiaje la capacidad se degrada por bajos niveles. La capacidad de las unidades termoeléctricas disminuye durante el verano, por efecto de alta temperatura.

2 Las cifras están redondeadas a números enteros, por lo que los totales podrían no corresponder exactamente a las sumas.

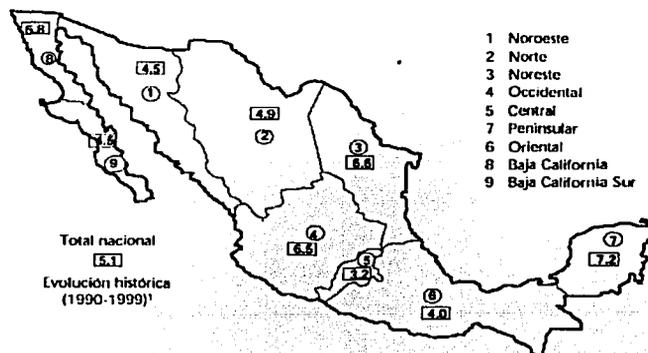
3 Incluye las centrales eólicas de 1.575 MW en el área occidental y 0.6 MW en las zonas aisladas.

Cuadro 1.1

Esto ha sido respuesta a las necesidades del país ya que son estas las regiones en las que se han concentrado los mayores niveles de crecimiento industrial debido a esto mayor crecimiento demográfico, así como, mayor migración de población.

Veamos ahora el crecimiento en las ventas por regiones (Fig 1.3), lo cual será reflejo del crecimiento en la demanda para cada región, esto muestra cuál es la región en la que se necesita un incremento de energía eléctrica, pero no será condición necesaria para que en esa región se instalen nuevas plantas de generación de energía debido a que, como sabemos, se tiene una Red Nacional de Transmisión, la cual es capaz de trasladar energía de un lugar a otro.

Crecimiento promedio anual de las ventas por región (%)*



* No incluye exportación

¹ Las TMCA para el periodo 1990-1999 se calcularon tomando como valor de referencia los datos del año 1989.

Figura 1.3 Crecimiento por región [Secretaría de Energía México, 2000].

Las regiones con mayor crecimiento en ventas son Baja California, Noreste, Occidental y Peninsular. Esto es muestra de que las condiciones de el país están cambiando, es decir están creciendo la industria y el nivel de población en estas regiones. De las cuales solo dos coinciden con las regiones con mayor capacidad instalada, que son la Noreste y la Occidental. De acuerdo a esto podemos determinar que existen dos zonas críticas que son la Peninsular y la de Baja California. Existe un gran problema con estas dos regiones ya que como lo habíamos mencionado anteriormente, se puede transmitir energía eléctrica de una región a otra con la red nacional de transmisión, pero en estos dos casos se tiene una limitante. Primero en la zona Peninsular la capacidad de transmisión es muy baja, y en el caso de la zona de Baja California no esta conectada a la red Nacional, esto lo podemos observar en el siguiente gráfico (figura 1.4), por lo que al incrementarse la demanda es necesario hacer una inversión fuerte para satisfacer las necesidades.



Figura 1.4 Capacidad de transmisión entre regiones [Secretaría de Energía México, 2000].

Las posibilidades son dos: cerrar la red de transmisión en esta zona, y la segunda es instalar plantas de generación de energía eléctrica para satisfacer necesidades propias.

Hablando ahora de los tipos de combustibles que se usan para la generación de energía eléctrica, podemos ver de datos obtenidos de Comisión Federal de Electricidad (CFE) de 1999 que el combustible mas usado para la transformación de energía son los Hidrocarburos debido también a que de la capacidad instalada en el país, mas del 50% está basada en el uso de hidrocarburos [CFE, 2000].

Generación bruta de electricidad en 1999
180,911 GWh

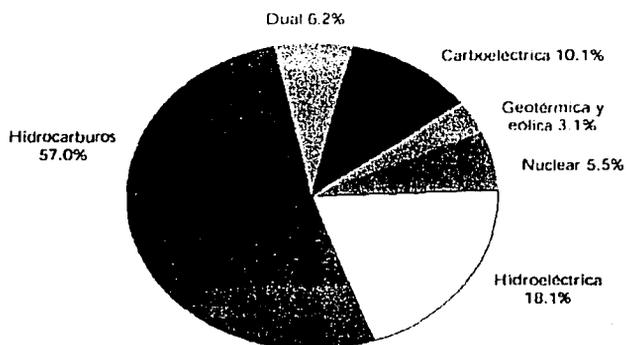


Fig. 1.5

Sistema Eléctrico Nacional
Capacidad efectiva al 31 de diciembre de 1999
35,667 MW

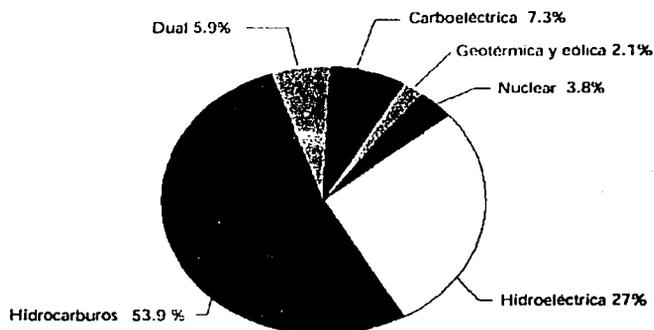


Fig 1.6

Podemos observar de las figuras 1.5 y 1.6 que mas del 85% de la capacidad instalada en el país se basa en hidrocarburos junto con hidroeléctricas, que son plantas cuyo funcionamiento se basa en el uso de recursos naturales no renovables, que a la fecha ya presentan problemas en cuanto su disposición.

Para el caso de plantas con quema de hidrocarburos, el problema se incrementa ya que los productos de combustión, son diversos gases contaminantes al medio ambiente que producen otros problemas como lluvia ácida, destrucción de la capa de ozono, y daños a la salud del humano.

Todos estos problemas están en contra de los acuerdos tomados, en Marzo del 2001, por los países miembros de la agencia internacional de energía en París, en cuanto a estándares de desarrollo sustentable para la producción de energía eléctrica, ya que estos establecen la disminución en el uso de recursos no renovables, así como la procuración en la disminución de contaminantes atmosféricos, entre otros. Aunque

México no sea miembro de esta agencia Internacional, se establecen estándares que en un futuro serán normas internacionales que se tendrán que cumplir, y desde ahora se debe tener la visión de implementarlas para no sufrir alguna crisis en un futuro.

Tomando en cuenta las condiciones en que se encuentra nuestro país y con la visión de que para el 2009 se deberá tener una capacidad de 257 TWh, es decir un incremento de 112 TWh en 10 años [Secretaria de Energía México, 2000], se deben de considerar diversos medios de generación de energía eléctrica haciendo uso de fuentes renovables de energía así como sistemas con mayor eficiencia y con altos niveles de seguridad e higiene al medio ambiente.

Con base en lo anterior, se puede decir que es necesario aumentar la capacidad instalada en la región de Baja California, que en esa zona hay necesidad de incremento de capacidad, y además en ésta se encuentra situada la principal planta de generación geotermoeléctrica del país, y que sería valioso realizar este aumento de capacidad sin recurrir a la perforación de más pozos geotérmicos, y sí por medio de un sistema de energía complementario que no esté basado en el uso de hidrocarburos.

La siguiente parte muestra una pequeña descripción de Campos térmicos en los cuales se incluyen los campos de Geotermia, y las características de dichos procesos que determinan la capacidad de dichas plantas.

1.2 GEOTERMIA Y LA CLASIFICACIÓN DE LOS CAMPOS TERMICOS

Cualquier punto de la superficie de la tierra corresponde a un área de esta, esto no significa que cualquier punto pertenezca a un campo. Por lo cual es necesario hacer una distinción entre un "área térmica" y un "campo térmico". Un área térmica está asociada con rocas de baja o nula permeabilidad bajo la superficie, lo cual no es factible para una explotación geotérmica. Un buen ejemplo de área térmica a la cual se le puede reclamar para ser un campo térmico, es la que se encuentra en Pathé en México. Aquí se tiene un gradiente de temperaturas de alrededor de $550^{\circ}\text{C} / \text{Km.}$, pero a pesar de haber perforado 17 pozos, algunos de diámetro de alrededor de 12 pulgadas, la cantidad de vapor obtenido es capaz de generar solo 150 kW [H.Christopher et al, 1983]. Por lo que podemos ver una inadecuada permeabilidad en el terreno.

Un campo térmico puede ser definido como un área térmica, donde la presencia de formaciones de rocas permeables bajo la tierra permiten el almacenamiento de un fluido de trabajo. El fluido de trabajo (agua y/o vapor, normalmente asociados con ciertos gases) sirve como un medio para transportar el calor a la superficie. Por lo tanto los campos geotérmicos requieren de agua y calor para su existencia, y son siempre conocidos como "Sistemas Hidrotérmicos".

Estos campos los podemos clasificar en tres tipos, como son:

- **CAMPOS SEMITÉRMICOS.** Capaces de producir agua caliente a temperaturas arriba de 100°C, desde profundidades de 1 ó 2 km [H Christopher et al, 1983].
- **CAMPOS HIPERTÉRMICOS.** Aquí hay dos tipos:
 - I. **CAMPOS HÚMEDOS.** Producen agua presurizada a temperaturas que exceden 100°C, por lo que cuando el fluido es llevado a la superficie y su presión disminuida, una fracción es estrangulada y convertida en vapor mientras que la parte restante permanece como agua caliente.
 - II. **CAMPOS SECOS.** Producen vapor saturado y seco, o levemente sobrecalentado a presiones arriba de la atmosférica.

Durante el siglo XX el desarrollo mundial de generación geotérmica de potencia ha evolucionado de manera creciente, y una proyección mundial realizada hace 20 años para el año pasado muestra que se tendría una capacidad instalada de 16,877 MWe en el caso de que todos los proyectos tentativamente planeados en ese año se hayan llevado a cabo [Hans Rau, 1984].

Según esta proyección, en México se debe tener a la fecha una capacidad instalada de energía geotermoeléctrica de 780 MWe, cantidad que ha sido rebasada debido a las necesidades de energía que el país ha tenido durante este periodo (capacidad instalada en geotermia a finales del 2000 es de 855MWe), y a que es uno de los medios de generación de energía mas baratos que puede haber dentro de los diversos sistemas de generación que existen como pueden ser plantas termoeléctricas, nucleoeeléctricas, entre otras.

1.3 IMPORTANCIA DE LA CALIDAD EN CAMPOS GEOTÉRMICOS.

Como se ha mencionado, la geotermia es una fuente natural de energía que debe ser explotada de manera eficiente para poder aprovechar la energía térmica, que comparada con otro tipo de energéticos es económica y relativamente limpia. Para el caso de pozos húmedos la cantidad de líquido caliente que contiene la mezcla que se extrae de los pozos es muy representativa, este líquido generalmente es agua con cierta composición de sales minerales (que en determinados casos la obtención de los minerales puede ser importante).

El concepto de potencial energético de un fluido geotérmico es entonces muy importante, ya que se refiere a la energía aprovechada del fluido extraído por que, dependiendo de las condiciones termodinámicas de éste se establecerá el proceso al que será sometido para la obtención de energía. El que un fluido geotérmico tenga un alto potencial energético depende en gran medida de la relación entre la cantidad de vapor contenido por cantidad de mezcla, lo que comúnmente en termodinámica se conoce como calidad de la mezcla. Un fluido geotérmico con una cantidad de vapor mayor que la cantidad de líquido saturado contenido en la mezcla, tendrá entonces un alto potencial energético y en dicho campo la obtención de energía será considerable.

Toma entonces especial importancia el estudio de la calidad de la mezcla obtenida a partir de los pozos, y se deberá hacer una evaluación de las propiedades termodinámicas de la salmuera ya que estas, dependen o están en función de la concentración de cloruro de sodio, puesto que así como existe una curva T-S para el agua, donde se representan propiedades del flujo en sus tres estados físicos, en el caso de la salmuera existen dichas curvas para diferentes concentraciones de cloruro de sodio disuelto en el agua, de la cual se extraerá el vapor.

En México la principal Planta de Geotermia se encuentra situada en Mexicali Baja California Norte en Cerro Prieto. Se trata de un campo geotérmico del tipo húmedo, de sus pozos se extrae energía suficiente para generar el 72.5% de la energía eléctrica de campos geotérmicos del país [CFE, 2000]. Debido a las condiciones del fluido obtenido de los pozos la calidad de este es muy baja por lo tanto su potencial energético, el cual podría ser mejorado si la calidad del vapor fuera mas alta.

Actualmente de la mezcla obtenida a partir de los pozos se hace una separación para hacer uso del vapor y retirar la salmuera, esta última es desechada con alta temperatura. La cantidad de líquido (salmuera) que no se está usando es bastante considerable y está en proporción de 2 a 1 con relación a la cantidad de vapor obtenido. Esta cantidad de salmuera puede convertirse en energía generada si se pudiera convertir a fase vapor, o de otra forma aumentar la calidad de la mezcla para obtener mayor cantidad de vapor a partir de ésta y así, aumentar el potencial energético del campo de geotermia.

El aumento de la calidad de vapor se puede hacer por muy diversos métodos, por ejemplo el uso de un generador de vapor, un sistema de recuperación de energía térmica (Cogeneración), una turbina de gas, etc.

La planta de Cerro Prieto se encuentra localizada en un lugar estratégico para la captación de energía solar, por lo cual es interesante continuar el uso de energías renovables, de tal modo que se puedan unir dos fuentes renovables de generación Solar – Geotérmico para el aumento de la Calidad de vapor y así un aumento del potencial de dicho campo.

Es importante tomar en cuenta la evidencia de que los combustibles fósiles llegarán a agotarse al cabo de unos años. La crisis del petróleo de 1973/ 74 dio ya un notable impulso al hecho de considerar con más detenimiento las nuevas fuentes de energía. No solo son muchos los países que han considerado necesario establecer un programa de energía solar y planear en consecuencia medios domésticos, sino que incluso los mismos trabajos de investigación y desarrollo energético – económicos emprendidos por la Comunidad Económica Europea se extienden ya a proyectos de energía solar [Cohen G. et al,1999].

En primer lugar hay que considerar en tales proyectos el costo de los colectores que, con accesorios e instalación, absorbe casi las tres cuartas partes de los gastos generales de una instalación de este género. Sin embargo, adoptando métodos de construcción más racionales o mejorados, puede lograrse una reducción de costos en una producción en serie. Mejorando también la tecnología de la acumulación de la energía podría incluso cubrirse, con sistemas solares, de un 30 a 70 % de la energía necesaria para fines domésticos .

1.4 OBJETIVOS DEL TRABAJO:

Al saber que la calidad del vapor obtenido en los pozos de geotermia es importante y de cierta manera la base para la determinación de la capacidad de generación de dichas plantas, los objetivos del presente trabajo serán:

- Diseñar y construir un equipo de medición de calidad de vapor, para evaluar dicha propiedad en la planta solar del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M.
- Evaluar el funcionamiento del equipo fabricado, y establecer los posibles errores en la medición.
- Evaluar la calidad del vapor de agua generado en dicha planta, para que en trabajos posteriores se cuente con un dato real de dicha propiedad.
- Si es factible, realizar la medición de la calidad de vapor obtenido a partir de salmuera geotérmica, generado por medio de concentradores solares de canal parabólico en la planta solar.
- Evaluar termodinámicamente diversos procesos para el aumento de la capacidad instalada con el uso de Concentradores solares de canal parabólico en la planta de geotermia de Cerro Prieto de C.F.E., y recomendar el sistema más adecuado.
- Establecer los problemas observados al hacer uso de la salmuera geotérmica en la generación directa de vapor.

2.-ENERGÍA SOLAR

2.1 ENERGÍA SOLAR

La conversión de energía solar en calor mediante colectores comprende una tecnología bien conocida. La complejidad de los dispositivos de conversión depende del nivel de temperatura que se desea alcanzar. En forma general, un colector solar es un dispositivo que transforma la energía solar en calor para transferirlo a un fluido apropiado [Almanza et. al., 1994].

Los colectores solares pueden dividirse en tres clases: captadores planos, concentradores de enfoque que siguen el sol y concentradores estacionarios.

Los captadores planos son los más sencillos, capaces de obtener temperaturas que van desde algunos grados arriba de la temperatura ambiente hasta otras del orden de 100°C; en esta clase se encuentran los colectores planos para calentamiento de agua o aire, los estanques solares, y los destiladores solares de agua.

Los dispositivos que aumentan la intensidad solar sobre una superficie absorbente, la cual recibiría solamente el flujo solar debido a su apertura, se llaman concentradores. La concentración de la radiación solar se logra mediante dispositivos ópticos que reflejan o refractan la radiación solar de manera que concentran el flujo incidente sobre un absorbedor de área mucho menor que la de apertura.

La principal ventaja de un concentrador sobre un colector plano es que el flujo de energía es mayor por unidad de superficie de absorción, por lo que se reducen pérdidas

térmicas, ya que el área del absorbedor es menor, lográndose en esa forma temperaturas más altas [Almanza et. al. , 1994].

2.1.1 CONCENTRADORES

Son dispositivos en los que se obtiene alta densidad de energía (radiación concentrada) sobre un absorbedor, suficiente para lograr temperaturas mayores de 200°C, pudiéndose llegar hasta 3800°C. Para lograr altas concentraciones (arriba de 100) se requieren mecanismos muy precisos para seguir el movimiento relativo del sol.

Los concentradores estacionarios se caracterizan por su concentración: mayor de 1 y menor de 10; no requieren un seguimiento preciso sino sólo un ajuste ocasional a lo largo del año. En cambio, los concentradores con razón de concentración dentro del intervalo de 10 a 3000 necesitan que sus curvaturas geométricas sean muy precisas, al igual que su mecanismo seguidor. Cuando hablamos de concentración nos referimos a la razón de concentración la cual esta definida como el cociente entre el área de apertura colectora y el área del absorbedor [Almanza et. al., 1994].

Las ventajas que se tienen al hacer uso de concentradores son las siguientes:

- La cantidad de energía colectada sobre la superficie de absorción por unidad de área se aumenta, con lo cual se pueden alcanzar altas temperaturas aprovechables en algún ciclo termodinámico o en dispositivos termoiónicos, termoeléctricos, magnetohidrodinámicos, entre otros.
- Reduciendo las pérdidas de calor al utilizar un absorbedor de menos área no solo se mejoran las eficiencias térmicas sino que también se reducen efectos transitorios, ya que la masa térmica es mucho más pequeña que en colectores planos.
- Los costos se reducen pues se reemplaza a un absorbedor costoso por un área reflectora o refractora menos costosa.

Las principales desventajas de los concentradores son:

- Trabajan solo con la componente directa de la radiación solar; el criterio de selección de estos sistemas debe incluir características geográficas, quedando restringida su utilización a lugares de alta insolación.
- La calidad óptica de la superficie reflectora requiere mantenimiento y protección intensiva contra su exposición a la intemperie.

Se ha mencionado que la temperatura máxima que se puede lograr con los colectores planos es del orden de 100°C; la eficiencia de Carnot de una máquina térmica que opere entre esa temperatura y la del ambiente, se limita a 20% aproximadamente, por lo que utilizarlos en un sistema termodinámico que incluya una máquina tal no resulta atractivo. En cambio, al trabajar con temperaturas del orden de 300°C, mismas que pueden lograrse con captadores de enfoque, la eficiencia de Carnot se incrementa al doble [Almanza et. al., 1994].

Cuando la radiación solar continúa incidiendo sobre la superficie receptora oscura, la temperatura sube, y las pérdidas caloríficas crecen hasta que se alcanza un estado de equilibrio cuando el calor que se recoge para ser utilizado y las pérdidas de calor igualan al calor recibido. En el estado de equilibrio se cumplirá:

$$q_{abs} = q_u + q_p = q_u + (q_r + q_a + q_c)$$

Con base en el balance de energía anterior se puede ver cómo, a una temperatura dada, los concentradores son inherentemente más eficientes que los colectores planos. El calor útil entregado al fluido de trabajo está dado por la energía recibida por el absorbedor, menos las pérdidas de calor al medio ambiente, es decir:

$$q_u = q_{abs} - q_p = q_{abs} - U_c(T_c - T_a) A_r$$

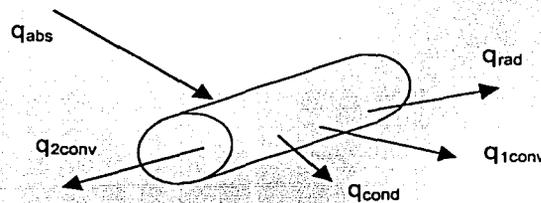


Fig. 2.1 Diagrama del Balance de energía

Donde la energía recibida por el absorbedor q_{abs} está dada por

$$q_{abs} = \eta_o A_a G_d$$

Siendo

A_a	área de apertura;
A_r	área del absorbedor;
G_d	radiación solar directa incidente sobre el colector;
T_a	Temperatura del aire ambiente, en °C;
T_c	Temperatura del absorbedor, en °C;
U_c	coeficiente global de transferencia de calor;
η_o	eficiencia óptica.
q_r	pérdidas por radiación
q_a	pérdidas por convección
q_c	pérdidas por conducción.

Si la eficiencia instantánea del colector es

$$\eta_c = \frac{q_u}{G_d A_a}$$

Entonces

$$\eta_c = \eta_o - \frac{U_c(T_c - T_a)}{G_d} \cdot \frac{1}{C}$$

Donde la razón de concentración C está definida como $C = A_a/A_r$

Debido a que las pérdidas de un colector plano en el que $A_a/A_r = 1$ crecen al aumentar la temperatura, la ganancia de energía a altas temperaturas es baja. En cambio, en concentradores al aumentar la razón de concentración A_a/A_r , manteniendo A_a constante, las pérdidas térmicas se reducen, permitiendo alcanzar altas temperaturas. Sin embargo, las pérdidas por flexión, factor de forma y la no concentración de radiación difusa en los concentradores, reducen la energía absorbida comparada con la que capta un colector plano [Almanza et. al., 1994].

Para colectores planos $C=1$ y para concentradores $C>1$. De la última ecuación es evidente que al aumentar el valor de C mayor será la eficiencia; este tipo de análisis es muy simple, ya que no refleja la reducción en la eficiencia óptica que ocurre debido al uso de espejos o lentes imperfectos. Además, para altas temperaturas es más complicado obtener U_c debido a que las pérdidas por radiación son muy importantes y proporcionales a la temperatura elevada a la cuarta potencia.

2.1.2 CONCENTRADORES ESTACIONARIOS

Los concentradores menos complejos son los que no requieren seguimiento continuo de Sol; éstos tienen un ángulo de aceptación muy grande, concentración baja y diseño con base en alguna curvatura sencilla; las concentraciones pueden llegar hasta 10 con un tiempo de captación del orden de 7 h, con ajuste una vez al día.

Los concentradores estacionarios de mayor concentración son los llamados parabólicos compuestos (CPC), desarrollados por Welford y Winston (1978) y Rabl (1976). Están formados por dos segmentos parabólicos simétricamente colocados alrededor de un eje (fig 2.2); el foco de cada parábola se localiza en el extremo de la superficie absorbidora coincidente con la parábola opuesta. El ángulo de cada eje de la parábola proporciona el ángulo de aceptación del concentrador.

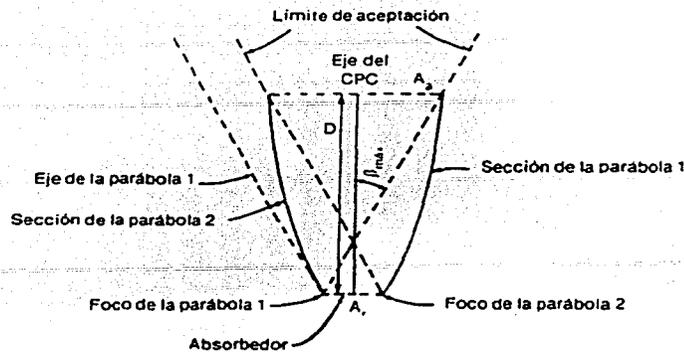


Fig. 2.2 Concentrador parabólico compuesto

2.1.3 CONCENTRADORES CON SEGUIMIENTO CONTINUO

Cuando se necesitan concentraciones mayores de 10 por periodos diarios de 6 h o más a lo largo de todo el año, se requieren sistemas con seguimiento del Sol. Existen dos tipos diferentes de concentradores al respecto: los de curvatura simple o concentradores cilíndricos, ya sea con curvatura circular o parabólica, y los de curvatura compuesta, o tipo platillo como los paraboloides de revolución y los casquetes semiesféricos[Almanza et.al.,1994]. Los concentradores de curvatura simple necesitan mecanismo seguidor con un grado de libertad (foco lineal), y los de curvatura compuesta dos grados de libertad mecánica (foco puntual) (figura 2.3). En estos sistemas, el seguimiento del Sol se hace generalmente a través de sensores fotosensitivos que envían una señal de naturaleza eléctrica a un sistema electrónico y un servomecanismo.

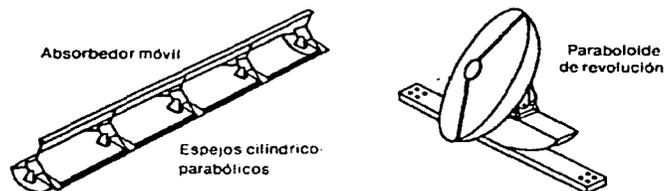


Fig. 2.3 Concentradores con seguimiento continuo

2.1.4 CONCENTRADORES CON CURVATURA SENCILLA

Uno de los sistemas que más se ha desarrollado en los últimos años es el concentrador cilíndrico-parabólico. En general, en los sistemas que están operando

actualmente, el absorbedor y el concentrador pueden o no girar simultáneamente; el objetivo principal es que exista un buen enfoque sobre el tubo absorbedor que se encuentra a lo largo del foco de la parábola (figura 2.4). Las concentraciones en dichos sistemas están en el intervalo de 15 a 50, y las temperaturas de trabajo alcanzables entre 200 y 350 °C .

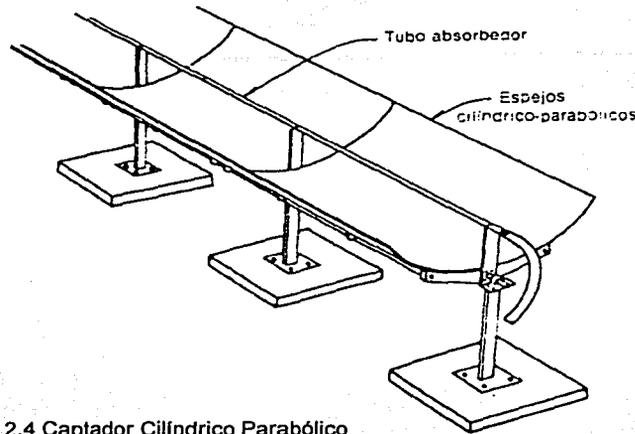
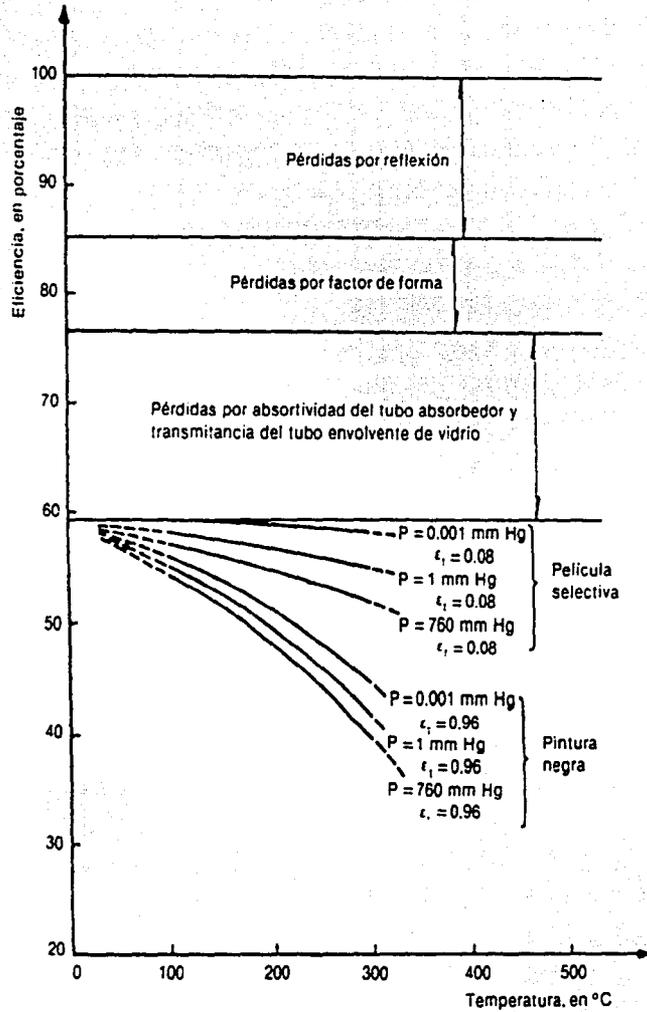


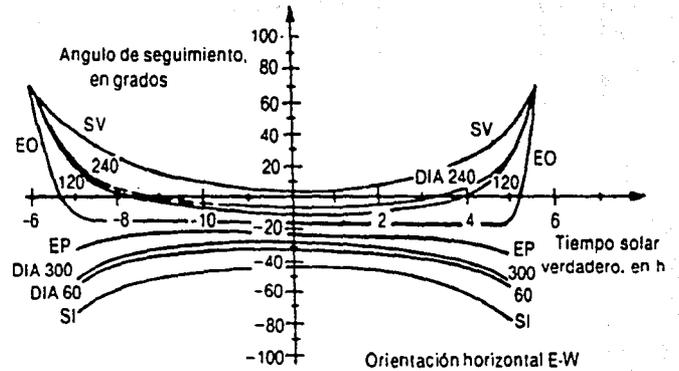
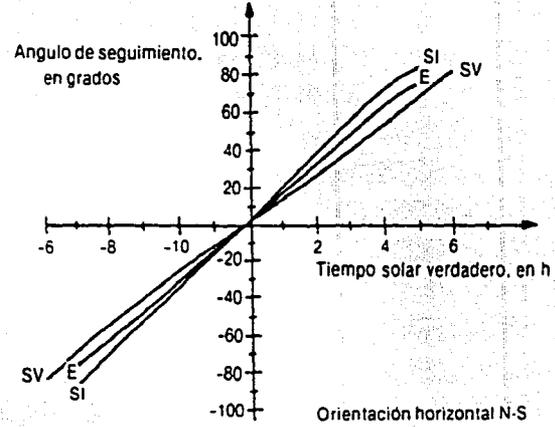
Fig. 2.4 Captador Cilíndrico Parabólico

Estos sistemas pueden operar con orientación N-S, E-O, o polar. Conforme su orientación, el movimiento angular necesario para seguir el Sol será más lento o más rápido; por ejemplo, en el caso de ser N-S, el movimiento es alrededor de 15°/h, en tanto que en E-O el movimiento alrededor del mediodía (4 h antes y 4 h después) es mínimo, como se muestra en el siguiente gráfico (fig. 2.5). La selección de la orientación dependerá de la cantidad de energía requerida a lo largo del día y a lo largo del año. En la figura 2.6 se muestra la eficiencia de los concentradores según la temperatura del tubo absorbedor; se observa que las pérdidas por reflexión debidas a la reflejancia de los espejos es de 15 por ciento; estas pérdidas no se pueden eliminar, ya que técnicamente sería difícil fabricar espejos baratos con mejores características ópticas. Las pérdidas por el factor de forma son las que se deben a la conservación de una buena geometría durante la construcción de cilindros parabólicos; este factor puede empeorar a lo largo del tiempo si la geometría se deforma [Almanza et al, 1994].

Un aspecto muy importante en el funcionamiento de un concentrador es el absorbedor. Como intento inicial para fijar el diámetro del absorbedor, es apropiado tratar de captar toda la energía reflejada por el espejo parabólico.



Eficiencia vs. temperatura de un colector cilindrico-parabólico.
Figura 2.6



S solsticio
E equinoccio
P primavera

V verano
O otoño
I invierno

Curva de seguimiento de colectores cilindrico-parabólicos.
Figura 2.5

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

El diámetro del receptor dependerá del tamaño angular del Sol, magnitud del error cometido en el seguimiento, error de curvatura del espejo, irregularidad de la superficie reflejante y de la absortancia angular característica de la superficie receptora. Las pérdidas térmicas son directamente proporcionales al diámetro del receptor, una vez que la radiación solar llega al absorbedor, es importante sea captada en la mayor medida posible, por eso es necesario cubrir el absorbedor con sustancias de alta absortividad. Otro tipo de pérdidas importantes en estos concentradores son las debidas a la convección y conducción de calor al medio ambiente, por lo que es necesario reducirlas mediante el encierro del tubo absorbedor dentro de tubos de vidrio y bajar la presión del espacio intermedio. En la figura de las eficiencias (2.6) se muestra cómo mejorar la eficiencia con la reducción de la presión [Almanza et. al., 1994].

2.1.5 CONCENTRADORES CON CURVATURA COMPUESTA

Para concentraciones arriba de 50 es necesario utilizar sistemas de curvatura compuesta, como son los reflectores paraboloides de revolución o los casquetes semiesféricos. Idealmente, estos sistemas funcionan durante todo el día con una incidencia de la radiación normal a su apertura con excepción del sistema conocido como reflector esférico estacionario con absorbedor móvil (SRTA).

2.1.6 SISTEMA DE TORRE CENTRAL.

Es un sistema de receptor central que consiste en una serie de HELIOSTATOS, o espejos que rastrean el Sol, los cuales reflejan la energía solar a una torre que tiene montado un receptor mas grande, la cantidad de calor concentrada que recibe el receptor, es transferida al fluido de trabajo , que puede ser almacenada para luego ser ocupada para producir trabajo. Los receptores centrales tienen muchas características positivas ,entre ellas [Pascal et. al., 1999]:

- Colectan energía de manera óptica y la transfieren a un solo receptor, minimizando los requerimiento de transporte,
- Tienen típicamente radios de concentración de 300 a 1500, es decir, son altamente eficientes ya sea en recolectar la energía y en convertirla a electricidad [Romero, 2000].
- Pueden convenientemente almacenar energía térmica
- Son mas o menos grandes, digamos de 10 mega Watts generalmente
- Pueden operar a temperaturas de 500 hasta 1500 °C [Romero, 2000].

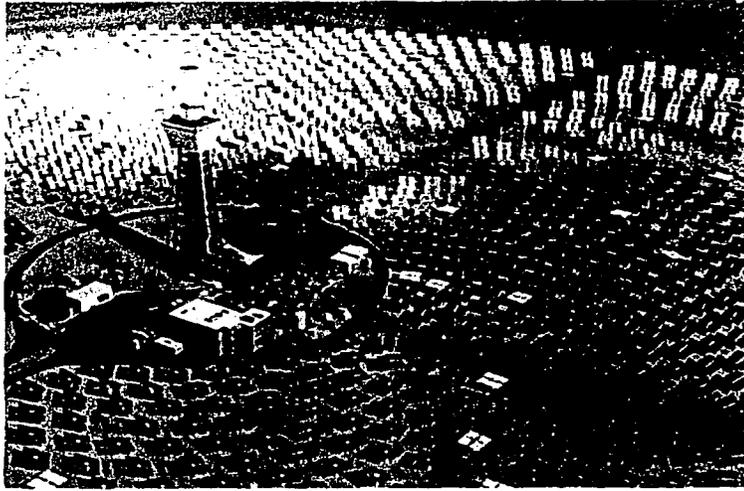


Fig. 2.7 Sistema de Torre Central

En la fotografía superior se aprecia el campo de helióstatos orientados de manera de reflejar en todo minuto la torre central la cual absorbe la radiación, mediante el fluido y lo lleva a una serie de tuberías que hacen un circuito cercano a la torre y que recorre el receptor, el almacenaje, y el sistema convertidor energético, lo cual minimiza las perdidas ya que el recorrido del fluido es mas corto [Gilbert et.al., 1999].

Existen 2 configuraciones básicas para este tipo de central: En el primero los helióstatos (mostrados en la figura 2.7) rodean completamente la torre receptora, y el receptor, el cual es cilíndrico, tiene una superficie con alta conductividad térmica .

En el segundo tipo, los helióstatos están colocados al norte de la torre receptora, y el receptor tiene una superficie intercambiadora menor que el anterior.

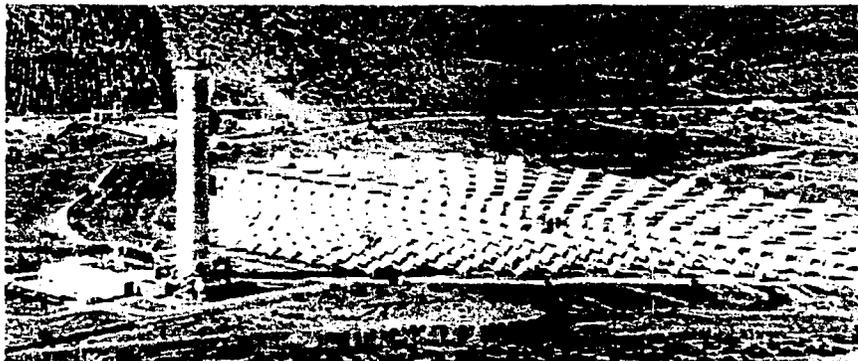


Fig. 2.8 Torre Central espejos lado Norte.

2.2 APLICACIONES ACTUALES DE PLANTAS SOLARES

Las centrales termosolares se encuentran todavía en una etapa anterior de penetración comercial, con una situación análoga a la que planteaban los aerogeneradores al principio de los años ochenta. Los desarrollos actuales darán lugar a una tecnología competitiva, lista para su comercialización en un plazo de diez años. Los Concentradores Cilíndrico parabólicos (CCp) constituyen la única tecnología solar térmica disponible comercialmente para la producción de electricidad [Romero, 2000].

Las plantas SEGS (Solar Electric Generation System) de California suministran una potencia pico de 354 MW (más del 80 por ciento de toda la electricidad solar en el mundo, incluyendo la fotovoltaica). A pesar de la drástica reducción de costos de las plantas SEGS (se han alcanzado de los 13 a los 15 centavos de dólar por kWh en la planta SEGS IV), todavía se necesitan mejoras adicionales de tecnología para reducir costos [Solar One, 1999].



2.9 Plantas SEGS en California

Es en Europa en donde se desarrollan iniciativas conducentes a la implantación de las plantas de CCp. Un estudio financiado por Endesa de España con ayuda de la Unión Europea y la participación de las empresas Ciemat y Flagsol, ha mostrado que la integración de estas plantas con bloques de potencia de ciclo combinado son la mejor opción para implantar la tecnología actual (colector LS3). También se ha realizado un estudio de viabilidad de una planta solar pura en Marruecos de 80 MW. La conclusión más importante de estos estudios es que la tecnología precisa desarrollos adicionales que permitan rebajar los costos de inversión y aumentar la eficiencia en la producción de electricidad [Romero, 2000].

El proyecto DISS, que agrupa a varias empresas europeas especializadas, cuyo producto final será un colector mejorado basado en la generación directa de vapor en el tubo, que producirá un 20 por ciento más de electricidad que el actual LS3 y reducirá en 15 por ciento los costos de inversión. Esto dará lugar a una reducción de 30 por ciento en el costo de la electricidad producida.

En el caso de las centrales de torre central, el esfuerzo más importante se centra en Estados Unidos. Aunque han existido desarrollos importantes en Europa, Japón, Israel y Rusia, solamente la central Solar One de 10 MW en Barstow, California, constituida por un campo de 1,818 heliostatos con un área recolectora de alrededor de 71,000 metros cuadrados, ha conseguido operar regularmente y generar datos suficientes de conexión a red. La central Solar One (con receptor agua / vapor) fue ampliada, aumentando el área total hasta los 200,000 metros cuadrados para trabajar con sales fundidas (Solar Two). En paralelo, en Europa se llevan a cabo actividades relacionadas con el uso de aire en receptores volumétricos mediante ensayos conjuntos de la Agencia Aeroespacial Alemana y Ciemat en las instalaciones de la plataforma solar de Almería [Solar One, 1999].

En España se encuentra en marcha la primera fase del proyecto Solgas que propone una planta solar de torre central con ciclo combinado y cogeneración, usando tecnología probada de helióstatos y un receptor de vapor saturado. Al participar dentro de la convocatoria Thermie de la Unión Europea, se espera continuar el proyecto para la construcción de una planta en el sur de España con una inversión de 50 millones de dólares, donde el campo de helióstatos proporcionaría unos 24 MW térmicos al ciclo termodinámico. Esta planta podría convertirse en el primer proyecto de carácter comercial con centrales de torre. No obstante, el programa más ambicioso en este campo es el Solar Parks en Estados Unidos, que prevé la construcción de tres parques con centrales de 100 y 200 MW en Nevada, California y Arizona, con el objetivo de alcanzar los 2,400 MW instalados en el año 2050 [Gilbert E. Et. al., 1999].

Para el rango de temperatura de operación previsto en los receptores (400-650 °C), no existe hoy en día una clara selección entre centrales de torre y CCp. Ambas tecnologías merecen atención y presentan objetivos de precio similares. Los discos parabólicos son la mejor solución para plantas por debajo de un MW y en aplicaciones aisladas. Las eficiencias de los sistemas de discos pueden alcanzar el 20 por ciento, mientras que torres y CCp se sitúan en el 15 por ciento. Los costos de inversión típicos

para las tres tecnologías varían en el rango de los 2,000 a 2,500 dólares por kW instalado.

Con base en las experiencias mencionadas anteriormente acerca de las plantas SEGS de California se establece que para las condiciones de operación de la salmuera geotérmica es posible hacer uso de Concentradores solares de canal parabólico para lograr el aumento de calidad de vapor obtenida de salmuera geotérmica. Serán entonces los mas adecuados desde el punto de vista del tiempo de captación ya que es un sistema con seguimiento de Sol, son de curvatura sencilla, y el rango de temperatura de trabajo es el que se pretende para el aumento de la calidad.

Un factor importante es su fabricación, desde el punto de vista comercial estos concentradores son los mas factibles teniendo a los tipo LS 2 como los que hasta el momento se han estudiado mas, y han dado mejores resultados comparados con sus similares de una generación anterior [Gilbert E et.al., 1999].

Las características de estos concentradores son las siguientes:

2.2.1 ESPECIFICACIONES PARA ENSAMBLES DE CONCENTRADORES DE CANAL PARABÓLICO LS - 2

Ensamble del colector Solar	LS-2
Area de apertura (m ²)	235
Apertura (m)	5.0
Longitud (m)	47.1
Razón de Concentración Solar	71
Reflejancia del espejo (limpio)	0.94
Eficiencia Optica	0.737
Absorbedor	
Diámetro de tubo(m)	0.070
Longitud (m)	4
Diámetro del tubo de vidrio (m)	0.115
# de Absorbedores por ensamble	12
Superficie Selectiva	Cromo Negro y Cermet
Presión de vacío en tubo de vidrio (torr)	10 ⁻⁴
Propiedades ópticas del Absorbedor	
Transmitancia de tubo de vidrio	0.95
Absortancia	0.95
Emitancia	0.24/0.19
a Temperatura (°C)	300

Finalmente la gráfica de la figura 2.10 representa la eficiencia pico de los concentradores LS 2. Dichas eficiencias son experimentales, por lo tanto se hará uso de ella para poder determinar la eficiencia a usar en cálculos posteriores.

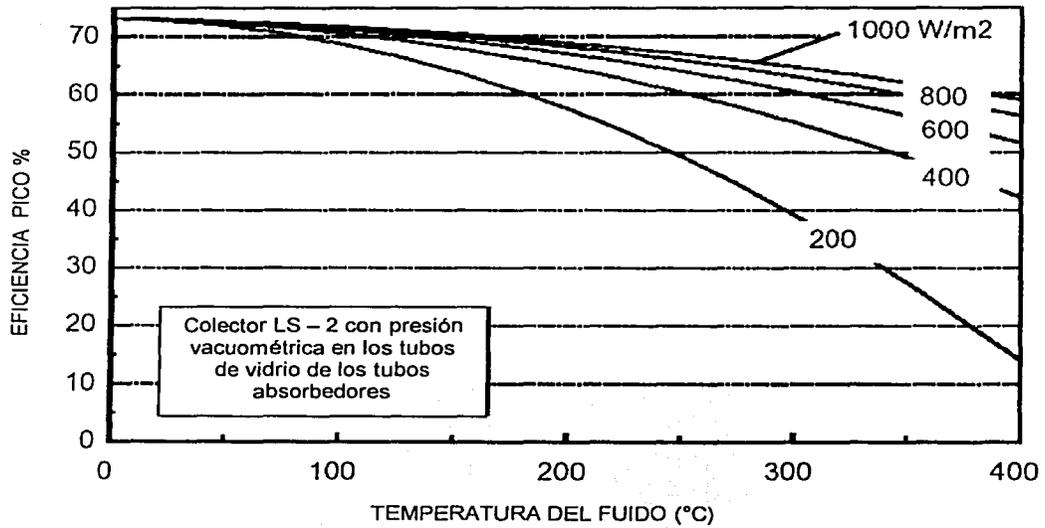


Figura 2.10 Eficiencia pico de concentradores tipo LS - 2 [Gilbert E. Et.al., 1999]

3.- PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LA SALMUERA Y CICLOS DE GEOTERMIA

3.1 TERMODINÁMICA DE LAS SALMUERAS

La presencia de sal en agua provoca cambios cualitativos a la termodinámica de agua pura. Mientras que para el agua pura se pueden encontrar dos fases dentro de una campana de saturación en un gráfico de temperatura entropía, cuyo vértice se forma a partir el punto crítico que se encuentra a 374°C y 220 bar, para la salmuera (agua con sales disueltas) el punto crítico se encuentra a presiones y temperaturas mayores. Se puede decir entonces que el punto crítico de la salmuera y su respectiva campana de saturación están en función de la concentración de sal (NaCl) que contenga la salmuera, por ejemplo para una concentración (n) de Cloruro de Sodio de $n = 30$ su punto crítico se encuentra alrededor de 700°C y 1240 bar [Elder, 1981]. Existe además una diferencia considerable en cuanto a la campana; para el agua arriba del punto crítico solo la fase de gas está presente, mientras que para el mismo caso en la salmuera se encuentran dos fases presentes, una fase líquida con alta concentración salina y de alta densidad, y otra fase de vapor con moderada o muy baja salinidad.

La variación del punto crítico con respecto a la presión y temperatura en función de la concentración de Cloruro de Sodio, se muestran en los gráficos siguientes (figura 3.1). Se puede observar que para concentraciones menores a 0.1 se puede considerar

que el punto crítico de dicha salmuera es el mismo que el del agua, al igual que la campana de saturación. El estado líquido se puede observar en la parte sombreada, la línea punteada representa el punto de saturación, y la parte sin sombreadar representa la fase de vapor [Elder, 1981].

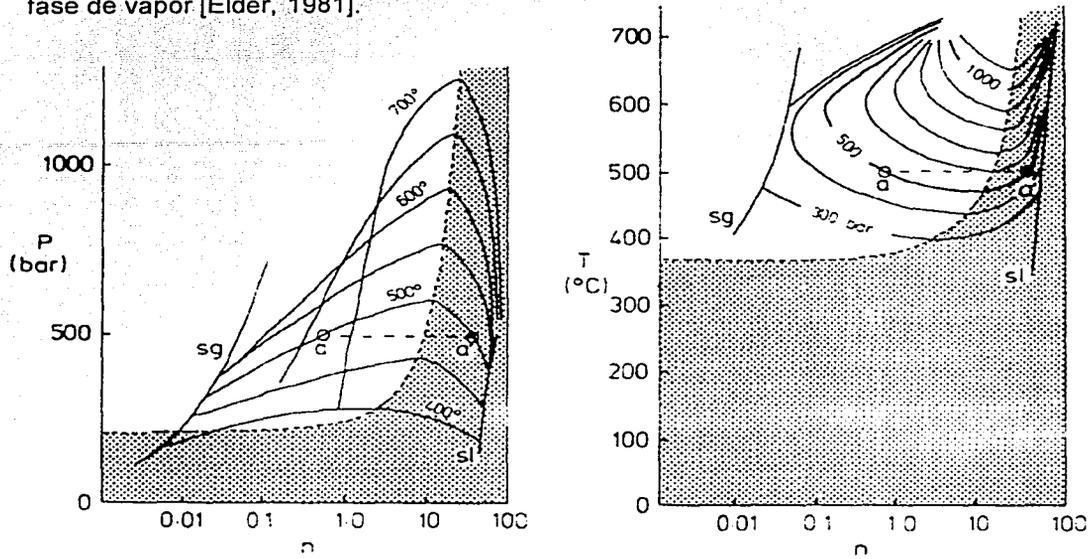


Figura 3.1 Punto crítico de la salmuera en función de la presión y temperatura con respecto a la concentración de NaCl

Se puede observar también que a presión y temperatura constante al realizar cambio de estado y pasar de fase líquida a vapor, la concentración de cloruro de Sodio en el vapor es menor al que tenía cuando se encontraba en estado líquido. De esta manera se comprueba que al evaporar una salmuera existirá una porción en fase vapor con baja concentración de NaCl y otra parte restante de agua con alta concentración de NaCl [Elder, 1981].

3.2 POTENCIAL ENERGETICO DE FLUIDOS GEOTERMICOS

El que fluidos geotérmicos sean obtenidos de la naturaleza a bajas temperaturas en comparación con los ciclos convencionales, implica que la eficiencia termodinámica del ciclo geotérmico sea necesariamente menor; además dichas plantas deben ser económicas ya que se tiene un bajo costo del calor, en comparación con los combustibles, estos son deseables desde el punto de vista de conservación de la energía, así como de aspectos contaminantes [Christopher et.al, 1983].

El potencial energético del vapor entregado por una planta no depende sólo de su presión, temperatura y calidad, así como, de su presión en la salida de la turbina, sino también de las configuraciones de la tubería del ciclo, separadores y válvulas en cuyos casos las pérdidas de presión y energía inducidas son considerables.

Diferencias considerables en cuanto a potencial energético se experimentan de una planta a otra, las curvas siguientes (figura 3.2) ejemplifican representativamente el caso de vapor seco [Christopher et.al, 1983].

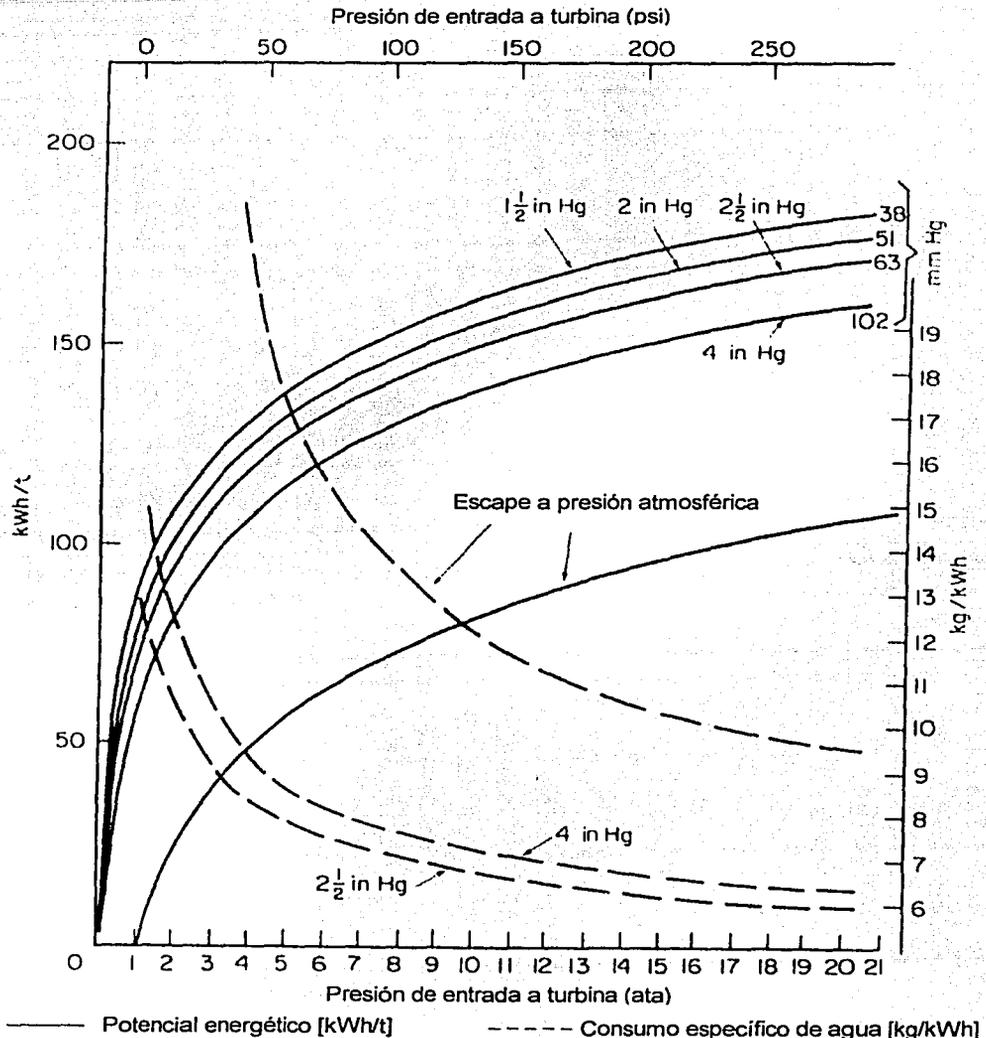


Fig. 3.2 Potencial energético del vapor, en función de la presión de escape.

Estas curvas consideran eficiencias razonables de la turbina y generador, y están expresadas en términos de energía entregada en las terminales del alternador, no incluyendo la energía consumida por equipo como deaeradores, bombeo de agua de enfriamiento, y misceláneos de equipos auxiliares. Dichas cargas parásitas pueden variar ampliamente dependiendo de la cantidad de gases no condensables presentes en el vapor, el vacío mantenido en el condensador, y el método de enfriamiento. El intervalo de porcentaje de pérdidas parásitas puede variar desde 0 hasta 48%, dependiendo del caso de unidad de turbo generador con ciclo no condensado, y para plantas de condensación con un contenido de gases no condensables de hasta 20%, respectivamente [Christopher et.al. 1983].

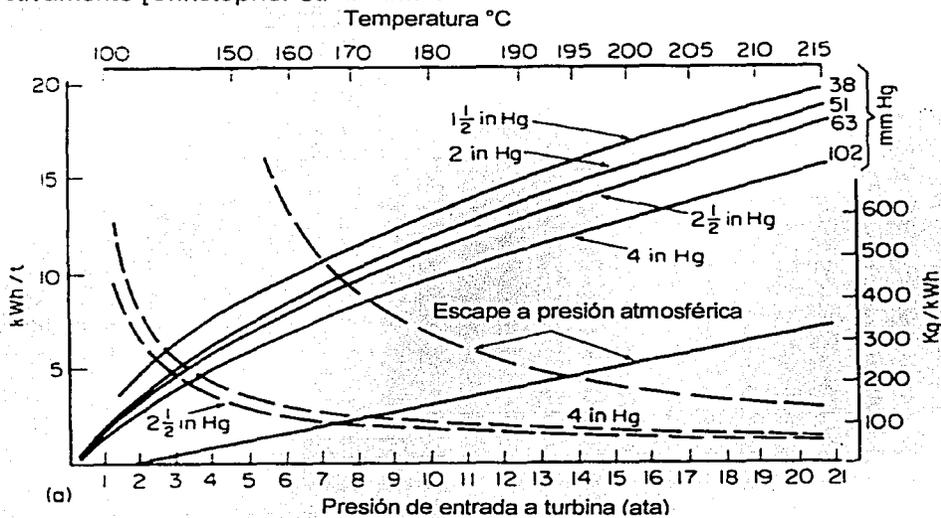


Fig. 3.3 Potencial energético en función de la presión.

Para el caso de una corriente de vapor sobrecalentado y seco, el potencial energético se debe determinar por medio de un diagrama de Mollier, ya que éste, depende del grado de sobrecalentamiento, así como de las eficiencias combinadas de la turbina, el alternador, la instalación de tuberías, etc. La eficiencia para este tipo de plantas varía entre un 70 y 76%, de acuerdo con la presión de admisión, el tamaño y arreglo de la planta [Christopher et.al., 1983].

El potencial energético de agua caliente, recuperable por el uso de estrangulamientos múltiples, es aproximadamente como se muestra en la figura 3.3. Este potencial cuando es expresado por kilogramo de fluido, es solo un pequeño porcentaje para el caso de vapor saturado y seco a la misma presión; se debe recordar

que la fracción de vapor de agua es algunas veces muy alta (6 ó 7 a 1), por lo tanto el potencial energético de agua caliente puede formar una fracción sustancial de este en un campo húmedo. En general el uso de agua caliente en un campo húmedo para generación de potencia, puede efectuar un gran ahorro por kilowatt, particularmente si existe la transmisión de flujo en dos fases, o si se adopta un sistema de bombeo desde un pozo profundo [Christopher et.al., 1983].

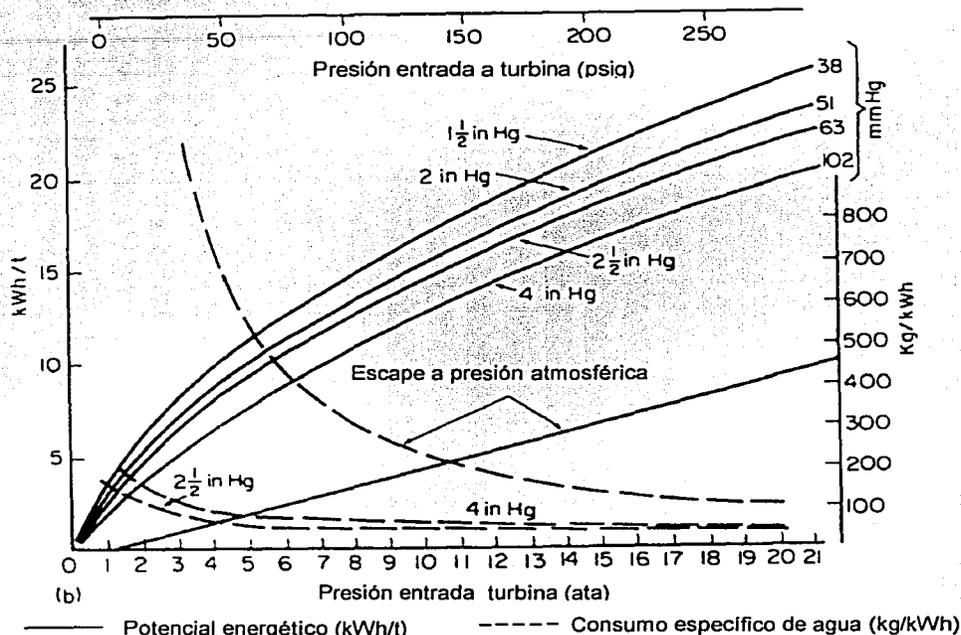


Fig. 3.4 Potencial energético para pozos que obtienen agua caliente (doble estrangulación)

3.3 EFICIENCIAS EN PLANTAS GEOTERMOELÉCTRICAS

Las eficiencias tan bajas de plantas geotermoeléctricas, se debe principalmente a las presiones y temperaturas tan bajas del fluido, lo cual no se puede mejorar debido a la ausencia de un ciclo cerrado que realmente al sistema; debido al aspecto económico de los condensadores de contacto directo de inyección generalmente usados en estos ciclos, en comparación con el costo de los condensadores de superficie, lo que compensa cualquier ganancia lograda en comparación con una alimentación a mayor temperatura lograda con estos intercambiadores [Christopher et. al., 1983]. Las eficiencias térmicas de las plantas de geotermia correspondientes con el potencial energético teórico de las curvas anteriores (fig. 3.4), asumiendo una

temperatura atmosférica de 15°C, son las que se muestran en las siguientes gráficas (fig. 3.5).

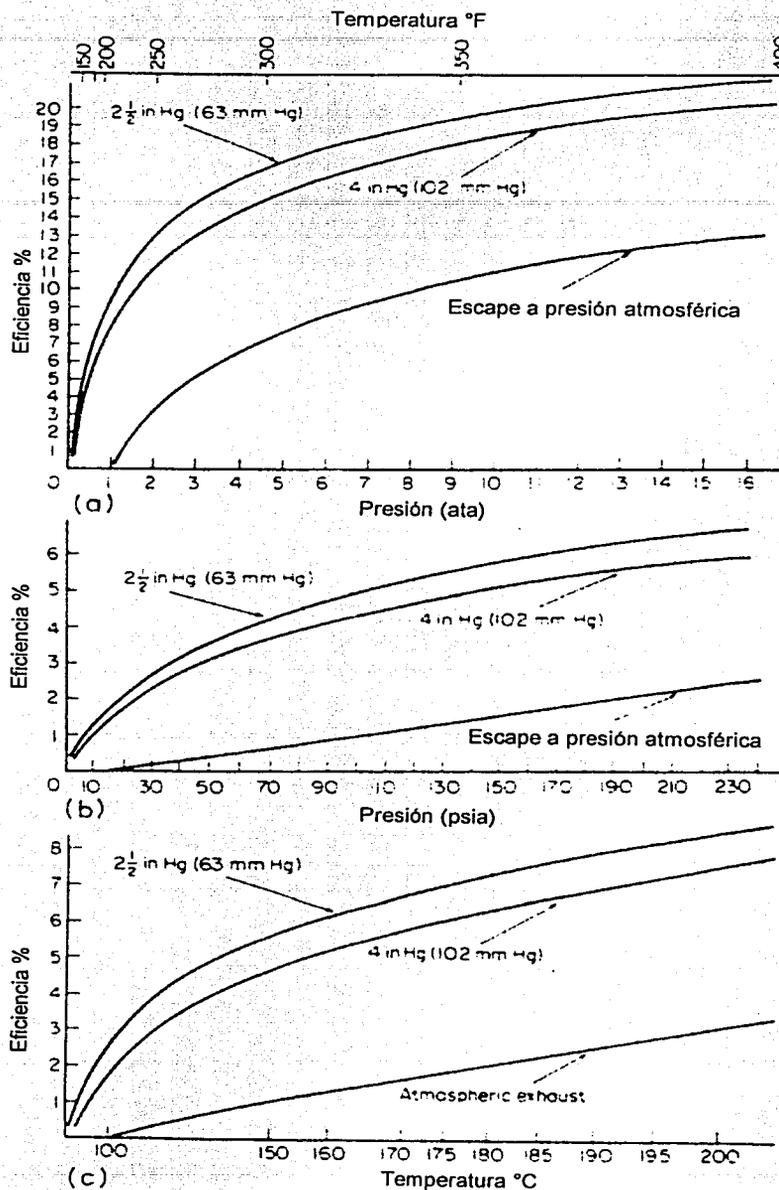


Fig 3.5 Eficiencias típicas de generación geotérmica a) Vapor saturado y seco, b) Agua caliente una estrangulación, c) Agua caliente (doble estrangulación)

Por ejemplo supóngase que se tiene una presión en la boca del pozo de vapor de 0.608 Mpa (6 ata), una presión a la entrada de la turbina de alrededor de 0.456 Mpa (4 ½ ata), y presión de salida de 0.0136 MPa (4 in de Hg), como se muestra en la figura 3.5a puede ser esperada una eficiencia térmica de 15% [Christopher et.al., 1983]. Si se sabe que de una Planta térmica convencional moderna puede ser obtenida una eficiencia de alrededor de 30%, esto muestra que tan extremadamente barato es el calor de la tierra, para hacer económicamente competitivo el ciclo geotérmico con los ciclos convencionales.

Para el caso de un campo húmedo que va a ser explotado, y se va a hacer uso de agua caliente por medio de doble estrangulamiento, la eficiencia de generación se reducirá aunque la cantidad de potencia generada se incrementará. Por ejemplo, una mezcla de vapor agua con una relación de 4:1, se entrega por separado a una planta con una presión de vapor a 0.456 MPa (4 ½ ata) y agua caliente a 158°C (1.4°C debajo de la temperatura de la boca del pozo, asumiendo que el 25% de la presión absoluta cae durante la transmisión), y que el agua caliente se estrangula dos veces, con una presión de salida de la turbina de 0.0136 MPa (4 in de Hg). Se puede demostrar cuantitativamente que la eficiencia será solo de 10.5%. A primera vista esta reducción de eficiencia de 15%, hasta aproximadamente de 10%, a pesar de incrementar el uso del calor puede ser sorprendente. La explicación miente en el hecho de que no coincide con las bajas eficiencias de la figura 3.5c, ya que las eficiencias no son tan bajas como la eficiencia total debido a que el cálculo no es realizado con base en el calor total producido en los pozos. En el ejemplo citado, la eficiencia al usar solamente la fase de vapor es de 14.9%, aunque intrínsecamente es solo de 5.27% cuando es comparado con el calor total producido en los pozos. Esta gran diferencia es debida a la pérdida de calor del agua, y en parte por la perdida de energía en la transmisión [Christopher et.al., 1983]. El uso de agua caliente incrementará esta eficiencia total, pero aún será considerablemente menor que la eficiencia de generación de potencia con solamente vapor, debido a la eficiencia tan baja por generar potencia usando el estrangulamiento de agua caliente. Esto no implica que el uso de agua caliente no sea económicamente justificado.

Para el caso de eficiencias en pozos secos, estas son poco mejores que las mostradas en la figura 3.5, debido a que después de su paso a través de la turbina se

obtiene vapor todavía seco, resultado de hacer uso de vapor sobrecalentado. Pero como el grado de sobrecalentamiento es usualmente moderado por el tiempo que el vapor llega a la planta, las diferencias son pequeñas y pueden ser despreciadas debido a las diferencias en calidad de diferentes plantas. Por ejemplo, en los Geysers los fabricantes de una unidad de 55 MW especifican un consumo de vapor de 411,649 kg/h a una presión de 0.689 MPa y 179.4 °C con una presión de salida de 0.0136 MPa. Esto equivale a una eficiencia de 17.3%, la cual coincide casi exactamente con la curva apropiada de la gráfica 3.5. Al no haber pérdidas de condensación en la tubería, debido a la condición de sobrecalentamiento del vapor, sino, pérdidas mínimas de drenado, y al no haber agua caliente que sea rechazada, la eficiencia total calculada será aproximadamente 5% menor que la estimada, es decir, de aproximadamente 16.43% [Christopher et.al., 1983].

Para el caso de que se tenga fluido de dos fases, es seguro que se va a hacer uso del agua caliente. La ausencia de desecho de condensado durante la transmisión, y la ganancia de vapor por estrangulación puede ayudar a hacer la generación un poco mas eficiente, que en el caso que se haga la transmisión de los fluidos por separado.

Se debe enfatizar que las curvas empíricas mostradas (fig. 3.5), deben de ser tomadas a partir del hecho que el contenido de gases no condensables en los fluidos geotérmicos varía ampliamente de campo a campo, y que esta variación afectará a las eficiencias totales, así como, al funcionamiento de la planta.

Concluyendo, se puede decir que indudablemente las bajas eficiencias de un ciclo geotérmico son una característica de éste. En el caso en que se tenga éxito al perforar a grandes profundidades con un costo aceptable, o en el caso de bolsas magmáticas tapadas a profundidades moderadas, es posible obtener fluido a altas temperaturas y presiones, que como hemos visto se pueden incrementar las eficiencias de generación de potencia. Por otro lado se pueden mejorar las eficiencias del campo, haciendo uso de la reinyección, la cual puede ofrecer la alternativa de hacer uso de agua caliente del campo húmedo, incrementando la vida del campo tanto como, la extracción de mas calor del fluido de los pozos [Christopher et.al., 1983].

3.4 CICLOS DE GEOTERMIA

Diversos tipos de ciclos termodinámicos son usados para la generación de energía eléctrica, para el caso de geotermia estos son:

- Ciclo de Condensación Indirecta
- Ciclo Directo o de no Condensación
- Ciclo de Condensación
- Ciclo de Estrangulamiento Simple
- Ciclo de Estrangulamiento Doble
- Ciclo de Fluido Binario
- Ciclo de agua caliente a presión vacuométrica

Vemos entonces algunas particularidades acerca de cada uno de estos sistemas, y daremos especial atención a los que presentan mayor oportunidad de aplicación.

3.4.1 CICLO DE CONDENSACIÓN INDIRECTA

Este ciclo fue uno de los primeros que se adoptó, después de los ciclos de generación directa, los cuales debido a la naturaleza corrosiva del vapor las turbinas y los ductos de admisión sufrían mucha agresión.

El sistema consta de un intercambiador de calor, en el cual, vapor limpio de sales minerales era generado por vapor natural "contaminado", y gases no condensables. Como se puede observar en la figura 3.6 el vapor natural pasa por el intercambiador de calor, donde cede energía, al salir de este pasa por un deareador donde se dejan escapar los gases no condensables que arrastra el vapor, y de nuevo entra como condensado para ser calentado por el vapor contaminado.

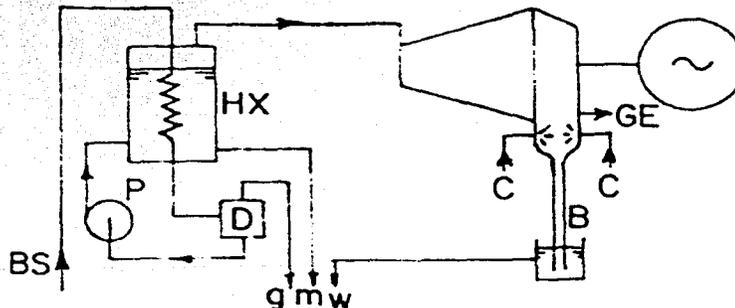


Fig. 3.6 Ciclo de Condensación indirecta

NOMENCLATURA	BF, Fluido extraído	HX, Intercambiador de Calor
	BS, Vapor extraído	PH, Precalentador
	BW, Agua extraída	BV, Vapor de fluido binario
	X, Purgas	BL, Líquido de fluido Binario
	C, Agua de enfriamiento	SC, Condensador de superficie
	GE, Extracción de gases	P, Bomba
	B, Barómetro	g, Descarga de gases
	SS, Separador de vapor	m, Agua mineralizada
	V	w, Agua de desperdicio
	V ₁ } Tanque de	Condensador de asperción
	V ₂ } expansión	
	F	D, Desgasificador
	F ₁ } Vapor de	
	F ₂ } estrangulamiento	

NOTA:

La nomenclatura del cuadro es la usada para las figuras siguientes (Fig. 3.1 a 3.7)

El vapor generado en el intercambiador de calor ya no contiene la misma cantidad de sales minerales, ya que dentro del intercambiador las sales sedimentan y son drenadas por este equipo [Christopher et.al., 1983].

Los casos para los cuales este ciclo geotérmico puede ser una buena opción, son aquellos en los que el vapor geotérmico contenga una porción considerable en peso de gases no condensables, y en el caso en el que estén presentes en el fluido emitido por el campo altas concentraciones de minerales valiosos.

3.4.2 CICLO DIRECTO O DE NO CONDENSACIÓN

Este ciclo geotérmico es el mas simple y barato en cuanto a inversión inicial, de cualquier otro. El vapor obtenido del pozo, ya sea directamente para el caso de pozos con vapor seco, o después de un separador en el caso de vapor húmedo, se introduce a una turbina para su expansión, y posteriormente se deja escapar a la atmósfera (figura 3.7).

El problema es que en este tipo de turbinas, la cantidad de vapor usado por kW generado es el doble que el usado en plantas de condensación, para la misma presión de entrada. Sin embargo estas plantas son usadas como plantas piloto, plantas de respaldo, para pozos aislados que proveen energía a pequeñas poblaciones, y en muy pocas ocasiones para satisfacer la demanda periodos de picos de carga.

Las máquinas de no condensación deben ser usadas si el contenido de gases no condensables en el vapor es muy alto, mayor al 50%, y se recomiendan preferentemente con el ciclo de condensación para contenidos de gases que excedan el 10%, por el alto consumo de potencia necesaria para extraer estos gases del condensador [Christopher et.al., 1983].

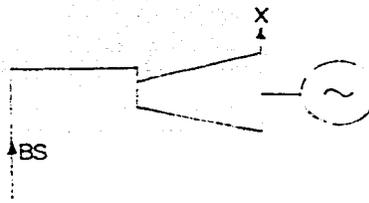


Fig. 3.7 Diagrama del Ciclo de no condensación.

3.4.3 CICLO DE CONDENSACIÓN

Debido a que no es necesario para este proceso hacer la alimentación del líquido condensado para iniciar el ciclo de nuevo, en este caso se usa un condensador de inyección directa en lugar de condensadores de superficie que son mas costosos.

En este ciclo el vapor de los pozos entra a la turbina, realiza trabajo sobre ella, y a la salida entra al condensador para obtener líquido, como se muestra en la figura 3.8. En el caso en el que la naturaleza y concentración de gases no condensables sean una amenaza para el medio ambiente, se usaran condensadores de superficie.

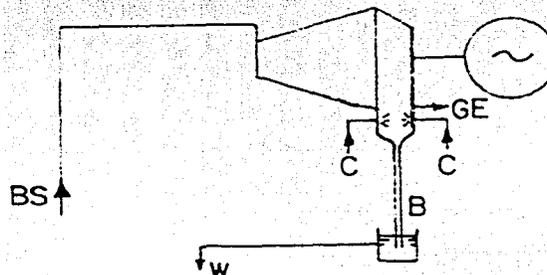


Fig. 3.8 Ciclo de Condensación [Christopher et al, 1983].

3.4.4 CICLO DE ESTRANGULAMIENTO SIMPLE

En campos geotérmicos húmedos es posible extraer una cantidad de energía suplementaria de la fase de agua caliente, haciéndola pasar por una válvula de estrangulamiento hasta un punto en que el vapor obtenido sea admitido en una etapa de presión de la turbina.

Idealmente la potencia máxima obtenida del agua caliente se dará si el tanque de estrangulación opera a una temperatura media entre la temperatura del agua caliente y la del condensador. La parte correspondiente de agua caliente que no alcance a estrangularse es purgada para otros usos, la figura 3.9 ejemplifica lo antes mencionado [Christopher et.al., 1983].

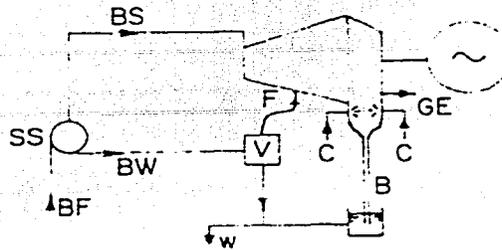


Fig. 3.9 Ciclo de estrangulamiento simple.

3.4.5 CICLO DE ESTRANGULAMIENTO DOBLE

Idealmente la máxima potencia que se puede extraer de la fase de agua caliente en un campo geotérmico húmedo, se tendría con un número infinito de tanques de estrangulación conectados en cascada, o en alguna proporción usando un tanque de estrangulamiento para cada etapa de presión de la turbina, pero dicho sistema sería exageradamente complicado, además de que se convierte en un absurdo económicamente hablando.

Pero puede ser factible haciendo uso de dos etapas de estrangulamiento (figura 3.10), operando tan cerca como sea posible en intervalos de temperaturas de un tercio y dos tercios de la diferencia de la temperatura del agua caliente, y la temperatura del condensador. Este ciclo fue adoptado en el esquema experimental de agua caliente en Wairakei, donde aproximadamente 68 a 70% de la potencia suplementaria del agua caliente es suministrada por la primera estrangulación, lo cual muestra que al implementar mas etapas no tiene mayor valor para la obtención de potencia, y sí lo desfavorece económicamente [Christopher et.al., 1983].

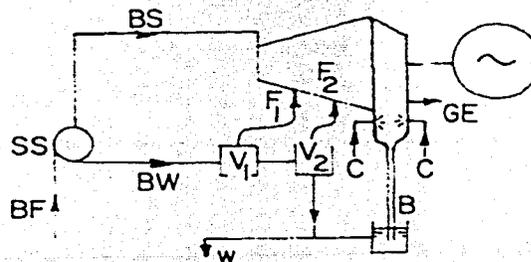


Fig. 3.10 Ciclo de estrangulamiento doble.

3.4.6 CICLO DE FLUIDO BINARIO

Para este ciclo se tienen dos fluidos para la generación de energía, por lo que recibe el nombre de Ciclo Binario, el fluido fuente de energía es el que sale del pozo, y en segunda parte, haciendo uso de fluidos refrigerantes de bajo punto de ebullición como son los freones, isobutano, propano, y otros fluidos de alto peso molecular usados para ciclos cerrados.

El funcionamiento del ciclo es como el que se muestra en la figura 3.11. El fluido extraído del pozo entra al intercambiador de calor, donde cede su energía al fluido refrigerante para evaporarlo, este fluido es parte de un ciclo termodinámico convencional como el Rankine. Algunas ventajas teóricas del ciclo binario son las siguientes: Se hace posible el uso de fluidos geotérmicos que se encuentran a bajas temperaturas. Hace uso de altas presiones de vapor, las que permiten un manejo seguro, así como un arranque rápido de la turbina y puede trabajar con mezclas de agua / vapor sin realizar la separación, entre otras

Algunas desventajas que se pueden encontrar en el ciclo son las siguientes: Se requieren condensadores de superficie muy costosos en lugar de condensadores de inyección, se necesita una bomba de alimentación absorbe una cantidad sustancial de energía del generador. Los fluidos de trabajo son volátiles, algunas veces tóxicos y flamables, y se deben tener controladas todas las fugas, sellando muy bien la tubería. reflejándose en plantas muy caras.

El primer ejemplo de este ciclo geotérmico en su forma productiva, fue una planta de 750kW nominales en Paratunka en la antigua URSS. Esta planta usaba agua geotérmica caliente a 81°C como fluido primario de energía, y como fluido secundario Freón 12 (Fluido Binario), además de agua de enfriamiento entre 6 y 7°C. Las pérdidas por cargas parásitas reducían la salida neta de energía a 450kW, por lo que se cambió la maquina por razones obvias [Christopher et.al., 1983].

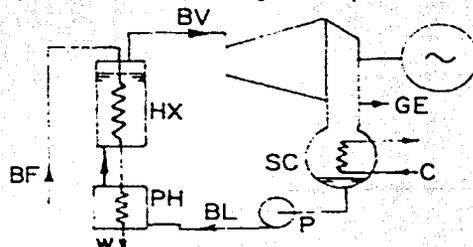


Fig 3.11 Ciclo de fluido binario.

La evolución de este ciclo ha llevado a obtener mejoras en la producción de energía, como la planta geotérmica en el este de Mesa. Se trata de una planta de ciclo dual binaria, usando dos circuitos uno para propano y otro para isobutano.

Agua caliente alrededor de 182°C calienta al ciclo de isobutano, obteniendo 10 MWe a una presión de entrada a la turbina de 500 a 600 psig, el calor rechazado por el isobutano entra al ciclo de propano, el cual trabaja a 58 psig a una temperatura de 94°C generando 2.5 MWe, con los cuales se alimentan todos los equipos auxiliares de la planta, por lo que se obtiene una salida neta de 10 MWe del total de capacidad de las dos turbinas [Christopher et.al., 1983].

3.4.7 CICLO DE AGUA CALIENTE SUBATMOSFERICA

En este ciclo lo que se trata es obtener vapor por medio de estrangulamiento de agua caliente a presiones mas bajas que las atmosféricas, usando una cámara de vacío (figura 3.12). Existió una planta de este tipo que generó alrededor de 220 kW llamada Kiabukwa, en Katanga Zaire. Usaba agua caliente a 91°C que era atomizada dentro de la cámara a una presión de 0.3 ata, obteniendo así, vapor estrangulado que se hacía pasar por una turbina de baja presión de tres etapas, y posteriormente al condensador, con agua de enfriamiento a 24°C [Christopher et.al., 1983].

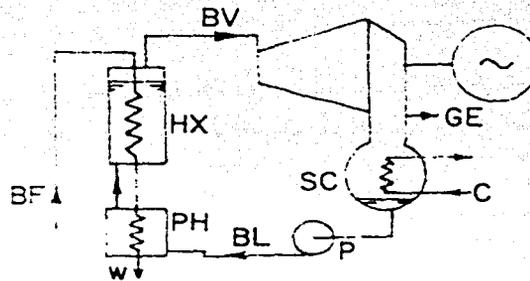


Fig 3.12 Ciclo de agua caliente subatmosférica.

3.5 CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO MEXICO

Este campo está situado a unos kilómetros al sur de Mexicali, situado sobre la falla de San Andrés la cual se extiende desde el Golfo de California al Cabo de Mendocino, situado este último entre San Francisco y el Límite de el estado de Oregon.

Un corte transversal del campo se ilustra en la figura 3.12. Una base granítica, presentando fallas en diversos lugares, a una profundidad de 2500 m debajo del

campo, pero incrementándose al oeste hasta salir a la montaña Cucapah. Una capa impermeable de arcilla plástica, de 700 m de espesor funciona como tapa de roca, mientras entre estas dos se encuentran capas alternadas de lutita y areniscas las cuales son suficientemente permeables para permitir la formación de un acuífero. Una área de recarga para alimentar el acuífero con agua meteórica es suministrada por las corrientes aluviales que soplan desde el este, mientras la presencia del volcán Cerro Prieto es muestra de que en el pasado el magma emergió a la superficie, y la existencia presente de una intrusión magmática a cierta profundidad, la cual es la fuente de calor para el sistema. Es posible que el calor conducido a través de la base granítica sea suministrado por medio de las fallas debido al escape de vapores magmáticos [Christopher et al., 1983].

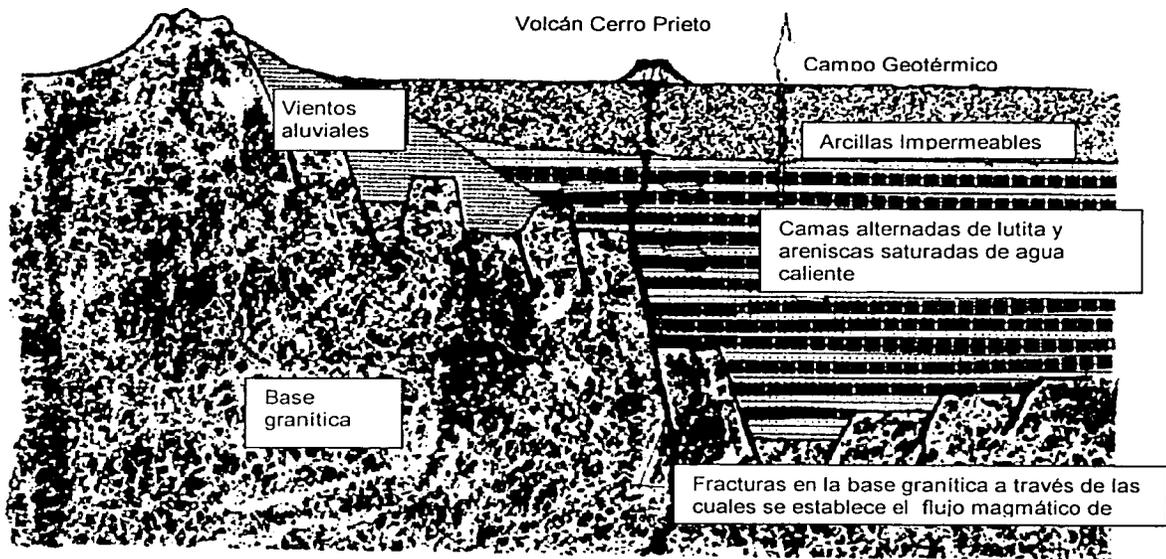


Fig. 3.13 Corte transversal de los pozos en Cerro Prieto

Cerro Prieto IV contará con cuatro turbinas de 25 MW cada una, por lo que en total tiene una capacidad de generación de 100 MW [CFE, 2001]. De la clasificación que se realizó anteriormente Cerro Prieto pertenece a el tipo de estrangulamiento en dos etapas, con una etapa de separación, es decir, después de la extracción del pozo se hace una separación para obtener vapor saturado. El agua caliente que queda se vuelve a estrangular para obtener vapor de media presión, y se realiza la misma

operación para obtener vapor de baja presión. La siguiente figura (3.14) muestra la configuración relacionada.

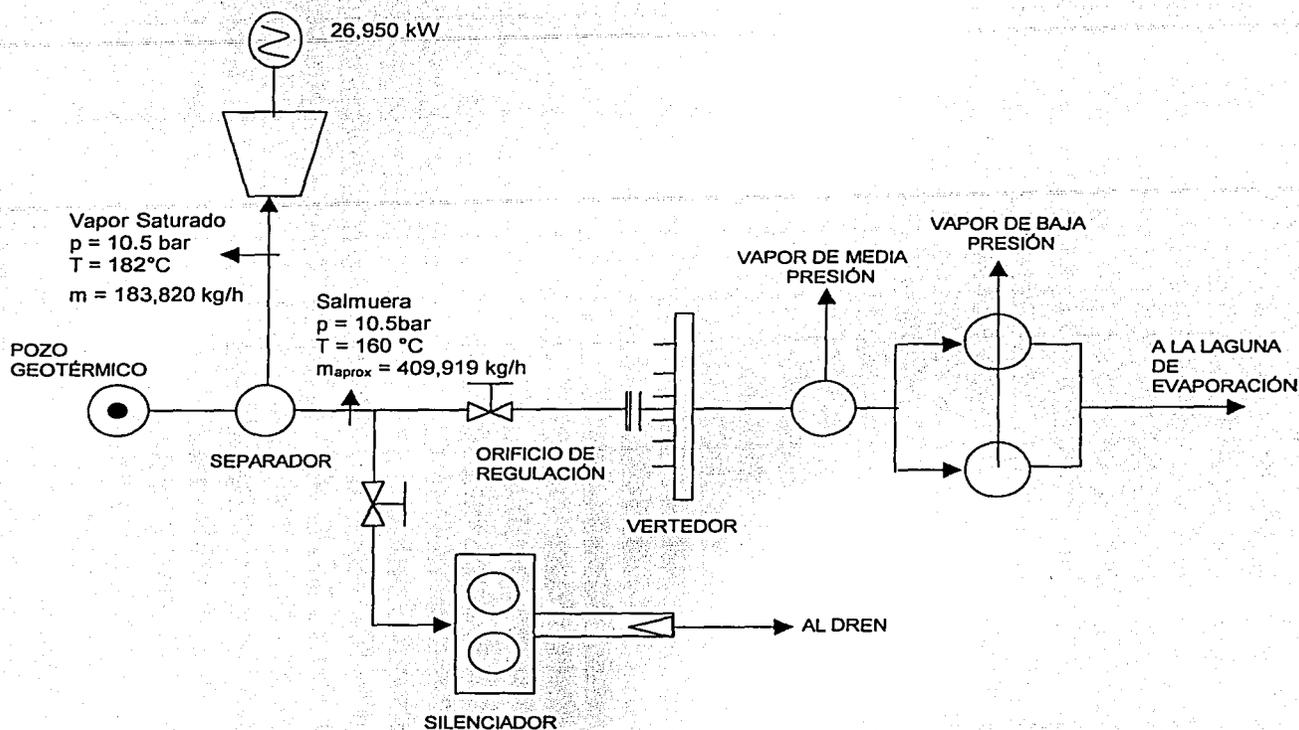


Fig. 3.14 Configuración Actual de Cerro Prieto

El vapor que entra a la turbina, después de haberlo separado de la salmuera con la que sale del pozo, tiene las siguientes propiedades.

MASA DE VAPOR	183,820 kg/h
PRESIÓN	10.5 bar
TEMPERATURA	182°C
ENTALPÍA	2,780 kJ/kg

La masa de vapor anterior, antes del separador representa una proporción de la mezcla del 32%, es decir el 68% restante es agua caliente a una temperatura aproximada de 200°C. Por lo tanto tenemos un gasto másico de agua caliente de 409.91 T/h, para cada una de las cuatro unidades generadoras, entonces en total se

tiene un gasto de 1,639.67 T/h de agua caliente. Esta es la cantidad de agua que se tiene que convertir en vapor por medio de energía solar, para poder aprovechar su potencial térmico y aumentar la cantidad de energía que produce la planta.

Los datos abajo mostrados se obtuvieron de la tabla del apéndice A, cuya información se obtuvo de Comisión federal de Electricidad.

Calidad en función de la cantidad de vapor de la mezcla	
	Ton./h
Masa de vapor	1.00
Masa de salmuera	2.23
Masa de la mezcla	3.23
CALIDAD=masa vapor/masa de la mezcla	30.96%

Calidad en función de la entalpia de la mezcla			
Entalpia en kJ/kg	1436.43	kJ/kg	
Propiedades a 10.5 bar	hf	772.23	hg 2780.0
	hfg	2007.7	
CALIDAD	33.08	%	

De estos datos se determina que la calidad de la mezcla obtenida de pozos es de 32% aproximadamente. La composición en peso de la salmuera geotérmica de Cerro Prieto, es la que se muestra a continuación:

Masa en Porcentaje	
NaCl	2.0324
KCl	0.3650
CaCl ₂	0.1184
SiO ₂	0.0918
LiCl	0.0138
H ₃ BO ₃	0.0084
MgCl ₂	0.0079
Otros	0.0067
Agua	97.3556
Total	100.000

De dicho análisis encontramos que la concentración en peso de Cloruro de sodio contenido en la mezcla es de $n = 0.02$, y con base en la figura 3.1 podemos determinar de manera confiable, que las propiedades de la salmuera de Cerro Prieto serán las mismas que las propiedades del agua. Entonces para posteriores análisis dentro de este trabajo las propiedades termodinámicas a usar serán las del agua.

4.-CONFIGURACIONES PROPUESTAS DEL SISTEMA HÍBRIDO SOLAR - GEOTÉRMICO

El análisis aquí presentado tiene un enfoque Termodinámico y es necesario remarcar que su base es la configuración planteada para Cerro Prieto IV, pretendiendo hacer el acoplamiento de un sistema solar para el aumento de capacidad incrementando la calidad del vapor a partir de salmuera, siempre y cuando se compruebe que por este medio es posible realizarlo.

Haciendo uso de los datos obtenidos del análisis geotérmico realizado en el capítulo anterior, en este capítulo se muestran las diferentes propuestas existentes para el sistema híbrido solar – geotérmico, para el caso de generación directa de vapor, es decir, alimentando el fluido de trabajo a los absorbedores de los concentradores de canal parabólico para obtener directamente vapor a la salida de los concentradores.

4.1 CASO ACTUAL

El caso actual en que se encuentra la plata de geotermia de Cerro Prieto en Mexicali B.C.N., es como se muestra en el diagrama de flujo siguiente (fig 4.1). La mezcla de vapor con salmuera que sale del pozo es llevada a un separador, del cual se obtiene por un lado, vapor saturado que se lleva a la turbina de generación, y por otro lado salmuera caliente que es llevada a las lagunas de evaporación. En esencia, de esta salmuera se quiere aprovechar la energía térmica que contiene, pero que no es suficiente para generar mas energía eléctrica, por lo cual la propuesta consiste en que la energía restante para obtener vapor saturado sea energía solar captada por concentradores

solares de canal parabólico, y así aprovechar las condiciones solares en las que se encuentra situada la planta de geotermia.

Cabe resaltar que las condiciones de la salmuera después del separador en cuanto a concentración de cloruro de sodio, hasta el momento en que se realizó este trabajo son datos desconocidos, por lo tanto para realizar los análisis siguientes se supone que la concentración y los datos termodinámicos de dicho flujo son los de una salmuera con baja concentración, superior al 3% pero todavía con propiedades termodinámicas del agua.

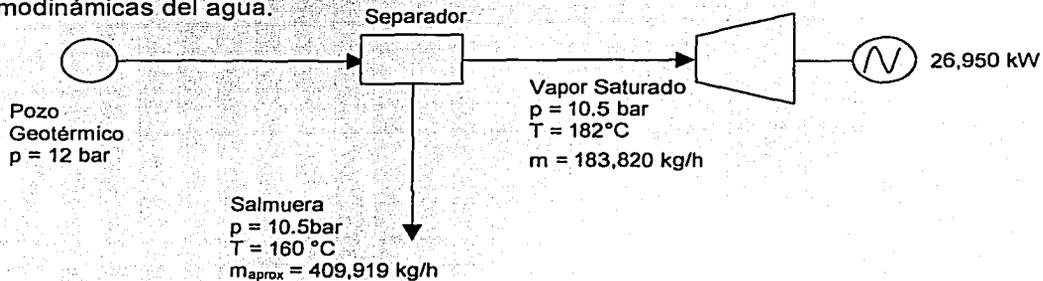


Fig. 4.1 Diagrama de la configuración actual.

Como se puede observar del diagrama de la figura 4.1, de una turbina que esta generando 25 MWe es posible recuperar un gasto másico de salmuera de 409,919 kg/h, es decir, aproximadamente 2.23 veces el gasto de vapor (Dato obtenido a partir del análisis de datos del apéndice A).

Hablando un poco acerca de la eficacia de esta planta, si tomamos como la energía total disponible al producto del gasto que sale del pozo por su entalpía, y la energía obtenida a la energía generada, aplicando primera ley este ciclo tiene una eficacia de 11.72%. Haciendo un balance exergético y evaluando la eficacia relativa o de segunda ley, para este caso se obtiene un valor de 96.05%.

Para este caso el análisis de segunda ley es importante debido a que por medio de este, se podrá evaluar la cantidad de energía disponible que se está desperdiciando durante el proceso, de tal manera que evaluaremos la cantidad de energía que se esta aprovechando a partir de la máxima disponible. Esta última se refiere a la diferencia que existe entre el trabajo real del ciclo y a el producto de la temperatura de referencia con la entropía producida durante cada etapa del proceso. De tal forma que el mejor proceso será el que tenga la mayor eficacia de segunda ley.

Debido a que en nuestro caso no hay un combustible que estemos quemando como fuente de energía, y que lo que estamos haciendo es un aprovechamiento de

energía solar y geotérmica hablaremos de eficacia como sinónimo de eficiencia como se ha hecho anteriormente.

Las opciones que presentamos caen dentro de dos casos, el primero es introducir después del separador la salmuera a los tubos absorbedores para generar vapor y este vapor introducirlo a una turbina para generar energía eléctrica.

El segundo caso consiste en introducir la mezcla de vapor y salmuera que sale del pozo a los absorbedores, para aumentar la calidad del vapor de tal manera que al hacerlo pasar por el separador se obtenga una cantidad de vapor saturado necesaria para poder generar mas energía eléctrica.

4.2 CONFIGURACIÓN CON CONCENTRADORES DESPUÉS DEL SEPARADOR

Como ya se mencionó líneas atrás, a la salida del pozo de geotermia se tiene una mezcla de vapor con salmuera con una calidad del 31 % aproximadamente, esta entra a un separador del cual salen vapor saturado a 10.5 bar y 182° C, y por otro lado salmuera a la misma presión pero con una temperatura de 160°C.

La primer propuesta consiste en introducir esta salmuera a un campo de concentradores solares, para llevar una fracción de masa de esta salmuera a un estado de vapor saturado a 10.5 bar y 182°C. El diagrama siguiente (Fig. 4.2) muestra el balance termodinámico de esta propuesta, en este caso se propone la instalación de otra turbina, es decir el contenido energético térmico es el necesario para poder generar 25 MW, y así sustituir el vapor usado de los pozos para la generación de esta cantidad de energía o en su caso poder aumentar la capacidad instalada de la planta.

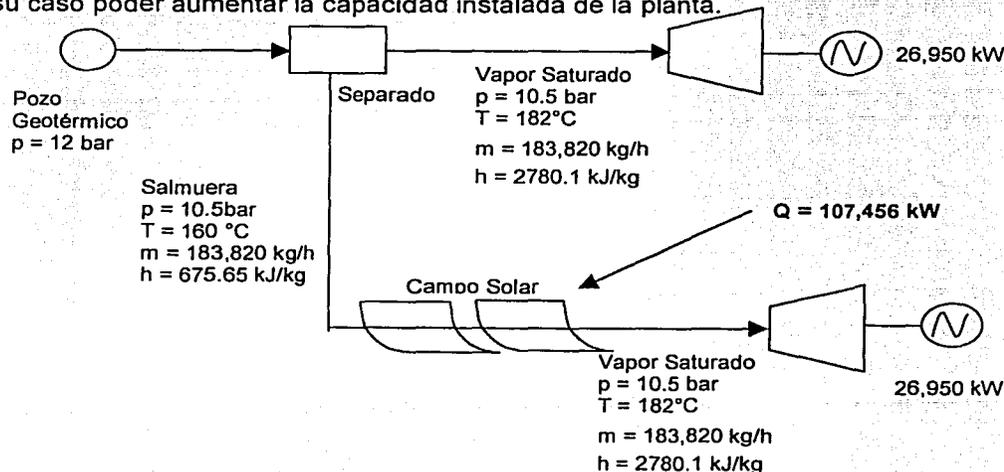


Fig. 4.2 Balance de la primer configuración propuesta.

Entonces es necesario suministrar 107,456 kW por medio de los concentradores solares para poder generar 25MWe mas. Se sabe que la radiación directa en Mexicali es de 776 W/m², y por otra parte que las horas por mes de insolación media anual en el mismo lugar es de 2462.4 horas/año, y tomando en cuenta que en promedio se tienen 30.42 días por mes, resulta un periodo de insolación de 6.75 horas/día; considerando que las normas de diseño recomendadas por asociaciones de energia solar recomiendan el uso de 5 horas al día, nosotros usaremos 6 horas / día como periodo de insolación y una eficiencia pico de los concentradores tipo LS II de 68%, por lo tanto el área de captación necesaria para este caso es de 203,638 m², lo que corresponde a 20.36 hectáreas de espejos de concentración solar.

El resultado obtenido muestra una magnitud muy grande en cuanto al área necesaria para la captación de energia solar, para este caso es necesario una instalación de 1107.81 m² de espejos por tonelada de vapor.

La eficacia de primera ley de esta configuración, haciendo el cálculo de la misma forma que el caso anterior es de 13.89 %, mientras la eficacia de segunda ley arroja un valor de 96.05%.

4.3 CONFIGURACIÓN CON CONCENTRADORES ANTES DEL SEPARADOR

Como se mencionó líneas atrás, la calidad de la mezcla de vapor con salmuera a la salida del pozo es aproximadamente de 31%. Para esta configuración se presenta la instalación del campo de concentradores antes del separador, de esta manera se pretende incrementar la calidad del vapor hasta un punto en el cual, después de separar la salmuera se obtenga vapor suficiente para alimentar a las turbinas.

Se sabe entonces que para alimentar a dos turbinas que generan 25MW cada una, se requiere un gasto de 367,640 kg/h. Este gasto de vapor saturado representa el 62% del total de mezcla que se obtiene del pozo, de tal manera que el 38% restante será o permanecerá en estado líquido, por lo que la calidad de vapor necesaria de la mezcla será de 62% .

Entonces la mezcla que se encuentra a una presión de 10.5 bar y con una calidad de 31%, se deberá llevar a un estado con la misma presión que el anterior pero con una calidad del 62%, para posteriormente llevarlo al separador y de este a las turbinas. El diagrama siguiente (fig.4.3) muestra las condiciones y estados mencionados anteriormente.

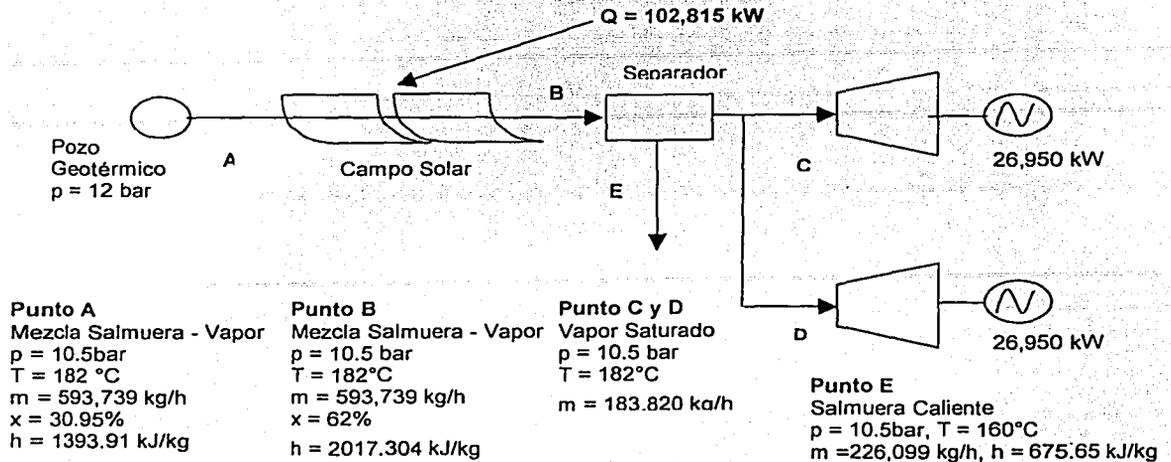


Fig. 4.3 Diagrama de la segunda configuración.

Para este caso es necesario suministrar 102,815 kW por medio de energía solar, de tal modo que tomando los mismos datos usados en el caso anterior de radiación, insolación, y eficiencia de concentración se llega a un valor de 194,843 m² de área de espejos de concentradores, es decir, 19.48 hectáreas de espejos. De tal manera que por cada tonelada de vapor generado extra, se requiere un área de 1059.97 m² de espejos.

Al realizar el cálculo de eficiencia de primera ley para esta configuración se observa un pequeño aumento con respecto al anterior, el valor de esta eficacia es de 14.14%, para el caso de eficacia relativa o de segunda ley el valor obtenido es de 92.54%.

4.4 CON CONCENTRADORES ANTES DEL SEPARADOR Y TRES TURBINAS

Se puede observar entonces que es posible alimentar otra turbina de la misma capacidad debido a que aún implementando la configuración anterior hay salmuera caliente de sobra, por lo que, existe la posibilidad entonces de operar bajo esta misma configuración de tal manera que se aumente la calidad y se logre alimentar a tres turbinas de la misma capacidad con la extracción de mezcla que en la actualidad solo alimenta a una turbina. El diagrama de la figura 4.4 muestra la configuración mencionada.

La cantidad de energía que se debe captar en este caso para la instalación de dos turbinas mas de la misma capacidad, es de 205,463 kW, por lo que el área de espejos necesaria para captar esta energía por medio solar deberá ser de 389,371 m² lo que

equivale a 38.94 hectáreas, y en este caso el área necesaria de espejos por tonelada de vapor es de 1059.11m². La eficacia para este caso es de 15.20% lo cual muestra un incremento considerable con respecto al caso actual en Cerro Prieto, y para el caso de eficacia de segunda ley esta es de 91.31%.

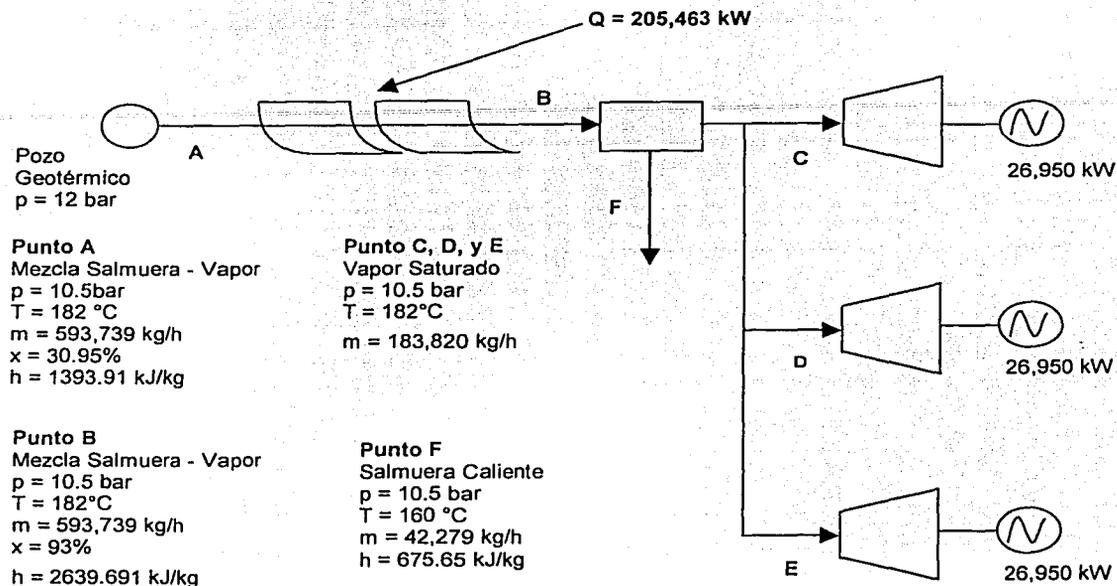


Fig. 4.4 Diagrama de la configuración con tres turbinas.

4.5 CONFIGURACIÓN CON CONCENTRADORES PARA UNA SOLA TURBINA

Para los casos anteriores se observa un incremento en la eficiencia lo cual se traducirá en aumento de la vida de los pozos en dicha planta de geotermia, pero es evidente que la superficie de espejos necesaria para lograr esta modificación es demasiado grande.

Por lo tanto a continuación se propone un caso en el que el flujo de mezcla sea el necesario para obtener vapor saturado para alimentar una turbina, es decir del pozo se extraerá solo la cantidad suficiente de mezcla para alimentar al sistema. Para este nuevo caso y como se observa del diagrama siguiente (fig. 4.5) el calor necesario para lograr un aumento de la calidad y lograr la saturación es de 70,780 kW. Para lograr captar esta

energía por medio solar es necesaria un área de espejos de 134.135 m², lo cual corresponde a 13.41 hectáreas de concentradores, de tal manera que el área necesaria de espejos por tonelada de vapor para este caso será de 1057.55 m².

Al evaluar la eficacia de primera ley para este caso se encuentra un valor de 15.38%, ésta es mayor que cualquiera de los casos anteriores, pero la eficacia de segunda ley no es la mejor a comparación de los otros casos y toma un valor de 90.86%, que de cualquier forma no es un valor muy bajo.

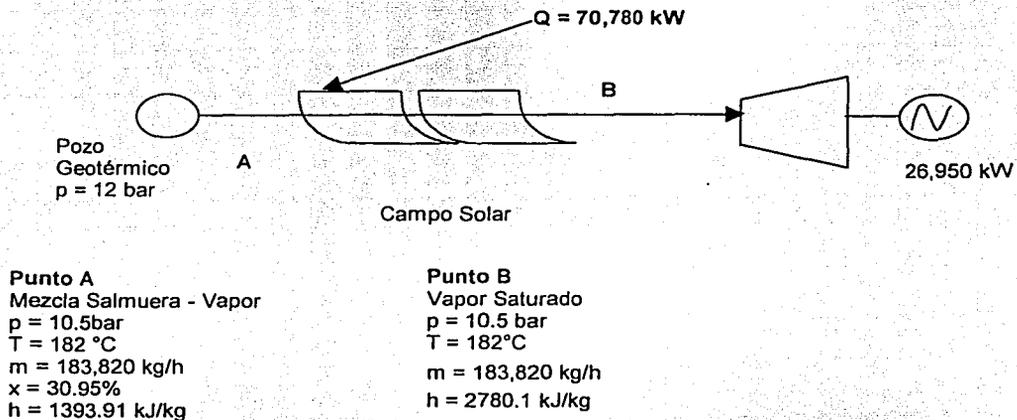


Fig. 4.5 Diagrama de la configuración con una sola turbina y concentradores solares.

Cabe mencionar que los casos evaluados anteriormente son considerando que las turbinas a usar son las que actualmente se encuentran dispuestas para la planta de geotermia de Cerro Prieto IV, que son cuatro de la misma capacidad y para todos los casos presentados la cantidad de mezcla extraída de los pozos es la misma que se esta usando ahora para poder generar solamente la energía de una turbina.

4.6 CUADRO COMPARATIVO DE LAS CONFIGURACIONES PROPUESTAS

El siguiente cuadro muestra los valores calculados anteriormente para poder compararlos de manera sencilla, y poder así tener una visión mas general de los datos mostrados individualmente para cada caso.

Cuadro 4.1 Valores característicos de cada configuración

<i>Característica</i>	<i>Energía generada</i>	<i>Área de espejos</i>	<i>Área por ton. de vapor</i>	<i>Eficacia 1ª ley</i>	<i>Eficacia 2ª ley</i>	<i>Potencial Energético</i>	<i>Factor de Aprovechamiento del pozo</i>
<i>Sistema</i>	<i>kW</i>	<i>ha</i>	<i>m²/(ton/h)</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>KWe/(ton/h)</i>	<i>%</i>
Configuración actual	26,950	0	0	11.72	96.05	45.39	31
Concentradores Después del Separador.	53,900	20.36	1107.81	13.89	97.62	90.78	62
Concentradores Antes del Separador, 2 turbinas.	53,900	19.48	1059.97	14.14	92.54	90.78	62
Concentradores antes del Separador, 3 turbinas.	80,850	38.94	1059.11	15.20	91.31	136.17	93
Concentradores para una sola Turbina.	26,950	13.41	1057.55	15.38	90.86	146.61	100

En el cuadro se puede observar un breve resumen de las características de cada sistema propuesto, y se incluyeron dos relaciones mas. La primera es el potencial energético la cual es la relación que existe entre la cantidad de energía eléctrica generada por cada sistema, y el total de mezcla de salmuera y vapor extraída de los pozos, esta última cantidad de mezcla permanece constante (a excepción de el caso de Concentradores para una sola turbina) debido a que estamos considerando que se debe aprovechar la energía térmica que contiene la salmuera y que se desperdicia actualmente durante para la generación de energía por medio de una sola turbina. Este valor tiene un máximo el cual es el consumo específico de dicha turbina, y se alcanza dicho valor en el último sistema propuesto que es cuando se produce y se extrae solamente el vapor necesario para generar 25 MW por medio de una sola turbina.

La segunda relación obtenida se ha denominado en este trabajo factor de aprovechamiento del pozo y se refiere a la relación entre la cantidad de vapor usado con respecto a la cantidad total de mezcla extraída del pozo. Por medio de esta relación se puede evaluar relativamente que tan bien se esta usando la cantidad de fluido que se extrae del pozo, aunque es muy ambigua esta relación, muestra o da idea de la cantidad de energía aprovechada del pozo perforado y de la maximización de la vida útil de dicho pozo.

Con referencia a dicha relación se observa un aumento gradual correspondiente a cada sistema propuesto, y es evidente que para el último caso en el que se extrae solo lo que se va a usar, este valor alcanza el 100%.

Como se puede observar en el cuadro, la eficacia de primera ley para el caso actual es relativamente baja, de hecho comparándola con los sistemas propuestos es la configuración con menor valor de eficacia de primera ley. Para los otros casos esta eficacia aumenta de tal manera que, en la última configuración propuesta esta eficacia toma un valor de 15.38%, comparándola con la eficiencia de 11.7% que se tiene actualmente.

Ocurre lo contrario para el caso de eficacia de segunda ley, ya que, para el caso actual se tiene un valor alto de 96%, y en el último caso toma un valor menor de 90.86%, que aunque disminuye se puede considerar un valor aceptable. En el caso de tomar a esta característica como factor fundamental de decisión para el sistema a usar, sin importar el valor de otros factores, la número dos que corresponde a los concentradores después del separador con un valor de 97.6% sería la configuración que se tendría que elegir.

Hablando un poco acerca de el área de concentradores se observan valores exageradamente grandes para todos los casos, se está hablando de hectáreas lo cual involucra costos demasiado altos, por lo que es necesario observar la configuración con menor valor de área, de este modo, la última configuración es la que menor área de concentración se tiene que instalar, y por tonelada de vapor generada también se obtiene un valor muy bajo, aproximadamente de 1057.55 m² por tonelada de vapor. Este valor es muy importante debido a que se puede observar que dependiendo la configuración a usar, la cantidad de superficie de concentradores por tonelada de vapor generada varía, entonces es necesario elegir la configuración que requiera menor cantidad de espejos por tonelada de vapor.

CÁLCULO DE RADIACIÓN SOLAR

			MAGNITUD	UNIDAD
Radiación directa en Mexicali			776	W/m ²
Insolación promedio anual	2462.4	h/año	6.75	h/d
Insolación de diseño			6	h/d
Radiación por hora			2793.6	kJ/m ²
Radiación solar por unidad de área			0.7760	kW/m ²
Eficiencia térmica de concentradores			68	%
Energía captada (G)			0.5277	kW/m ²
1año=12 meses 1mes=30.42días				

CÁLCULO DE CALOR NECESARIO DE LOS CONCENTRADORES

$$Q = m \cdot (h_{sal} - h_{ent})$$

	m (kg/h)	h _{sal} (kJ/kg)	h _{ent} (kJ/kg)	Q _{conc.} (kW)
Caso actual	0	0	0	0
Concentradores después del separador	183,820	2,780.10	675.65	107,456
Concentradores antes del separador (2 turbinas)	593,739	2,017.30	1,393.91	102,815
Concentradores antes del separador (3 turbinas)	593,739	2,639.69	1,393.91	205,463
Concentradores para una sola turbina.	183,820	2,780.10	1,393.91	70,780

CÁLCULO DE SUPERFICIE NECESARIA DE CONCENTRADORES

$$A = Q/G$$

	Q (kW)	G (kW/m ²)	A (m ²)	A (ha)
Caso actual	0	0.5277	0	0
Concentradores después del separador	107,456	0.5277	203,638	20.36
Concentradores antes del separador (2 turbinas)	102,815	0.5277	194,843	19.48
Concentradores antes del separador (3 turbinas)	205,463	0.5277	389,371	38.94
Concentradores para una sola turbina.	70,780	0.5277	134,135	13.41

Área de concentradores por tonelada de vapor útil.

	A/t = A/m		
	A (m ²)	m (ton./h)	(m ² /(ton/h))
Caso actual	0	0	---
Concentradores después del separador	203,638	183.82	1107.81
Concentradores ántes del separador (2 turbinas)	194,843	183.82	1059.97
Concentradores ántes del separador (3 turbinas)	389,371	367.64	1059.11
Concentradores para una sola turbina.	134,135	126.84	1057.55

CÁLCULO DE EFICIENCIA DE PRIMERA LEY

	m	h_{ent}	$Q_{geot} = m \cdot h_{ent}$	$Q_{sol} = Q_{conc} / \eta_{conc}$	$Q_{tot} = Q_{geot} + Q_{sol}$	W_e	$\eta_I = W/Q$
	kg/h	kJ/kg	$Q_{geotermia}$ kW	Q_{solar} kW	Q_{tot} kW	kW	%
Caso actual	593,739	1,393.91	229,894	0	229,894	26,950	11.72
Concentradores después del separador	593,739	1,393.91	229,894	158,023	387,917	53,900	13.89
Concentradores ántes del separador (2 turbinas)	593,739	1,393.91	229,894	151,198	381,092	53,900	14.14
Concentradores ántes del separador (3 turbinas)	593,739	1,393.91	229,894	302,152	532,046	80,850	15.20
Concentradores para una sola turbina.	183,820	1,393.91	71,175	104,089	175,263	26,950	15.38

$h_{ent} = 1393.91$ es la entalpía de la mezcla a 10.5 bar con una calidad de 30.95%

CÁLCULO DE EFICIENCIA DE SEGUNDA LEY

$$\eta_{II} = W_{REAL} / (W_{REAL} + T_0 S_P)$$

$$S_P = -\sum(Q_i/T_i) + \sum_s(m_s) - \sum_e(m_s)$$

				Salida salmuera		Salida vapor		
	Q_i kW	T_i K	(Q_i/T_i) kW/K	m_s kg/s	s_s kJ/kgK	m_s kg/s	s_s kJ/kgK	$S_s(ms)$ kW/K
Caso actual	0	0	0	113.87	1.9427	51.06	6.56965	556.66
Concentradores después del separador	107,456	456.16	235.57	62.81	1.9427	102.12	6.56965	792.92
Concentradores ántes del separador (2 turbinas)	102,815	456.16	225.39	62.81	1.9427	102.12	6.56965	792.92
Concentradores ántes del separador (3 turbinas)	205,463	456.16	450.42	11.74	1.9427	153.18	6.56965	1029.18
Concentradores para una sola turbina.	70,780	456.16	155.17	0.00	0	51.06	6.56965	335.45
	m_e kg/s	s_e kJ/kgK	$S_e(ms)$ kW/K	S_P kW/K	W_{REAL} kW	T_0 °C	S_P kJ/kgK	η_{II} %
Caso actual	164.93	3.35266	552.95	3.72	26,950	298.16	3.72	96.05
Concentradores después del separador	164.93	3.35266	552.95	4.41	53,900	298.16	4.41	97.62
Concentradores ántes del separador (2 turbinas)	164.93	3.35266	552.95	14.58	53,900	298.16	14.58	92.54
Concentradores ántes del separador (3 turbinas)	164.93	3.35266	552.95	25.81	80,850	298.16	25.81	91.31
Concentradores para una sola turbina.	51.06	3.35266	171.19	9.10	26,950	298.16	9.10	90.86

CÁLCULO DE POTENCIAL ENERGÉTICO

Potencial Energético = $W_e / \text{Vapor de Pozo}$

	W_e kW	Vapor de pozo Ton/h	Potencial energético kWh/Ton
Caso actual	26,950	593.739	45.39
Concentradores después del separador	53,900	593.739	90.78
Concentradores ántes del separador (2 turbinas)	53,900	593.739	90.78
Concentradores ántes del separador (3 turbinas)	80,850	593.739	136.17
Concentradores para una sola turbina.	26,950	183.820	146.61

CÁLCULO DEL FACTOR DE APROVECHAMIENTO

F.A. = $\text{Vapor Usado} / \text{Vapor de Pozo}$

	Vapor de pozo Ton/h	Vapor usado Ton/h	F.A. kWh/Ton
Caso actual	593.739	183.820	31
Concentradores después del separador	593.739	367.640	62
Concentradores ántes del separador (2 turbinas)	593.739	367.640	62
Concentradores ántes del separador (3 turbinas)	593.739	551.460	93
Concentradores para una sola turbina.	183.820	183.820	100

5.-DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CALORÍMETRO

5.1 CALIDAD COMO PROPIEDAD TERMODINÁMICA

Cuando al agua se le suministra energía calorífica, sus propiedades y su estado físico varían. A medida que tiene lugar el calentamiento, la temperatura llega hasta alcanzar al punto de líquido saturado. A partir de aquí la temperatura se mantiene constante mientras el líquido cambia de estado, es decir, se evapora. Cuando el líquido se ha evaporado completamente, se llama vapor saturado y seco; si se sigue suministrando calor, la temperatura deja de ser constante y vuelve a aumentar, pasando el vapor a lo que se denomina vapor sobrecalentado. Cuando la temperatura aumenta o disminuye, se dice que el calor es sensible; cuando permanece constante se dice que es latente [Faires et.al., 1970].

Para determinar el estado de una sustancia es necesario conocer sus propiedades en un momento determinado. Estas propiedades son: presión (p), temperatura (T), volumen específico (v), energía interna específica (u), entalpía (h) y entropía (s). La temperatura, la presión y el volumen pueden determinarse por experimentación; las otras propiedades se calculan en función de estas tres variables.

Para poder definir el estado de una sustancia es necesario conocer por lo menos dos de ellas, cuando se está hablando de al menos una irreversibilidad en el proceso. Como puede verse en la figura 5.1, durante el cambio de fase en la región del vapor húmedo, la temperatura y la presión permanecen constantes por lo cual se requiere conocer el grado de humedad para conocer todas sus propiedades [Severns et.al. 1974].

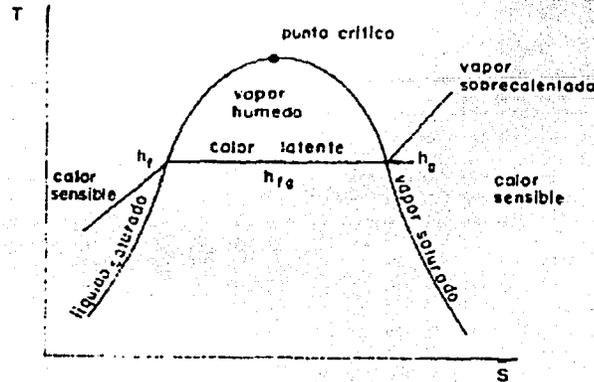


Fig. 5.1 Diagrama de Mollier

5.1.1 CALIDAD DEL VAPOR

La calidad del vapor se define como el porcentaje en peso del vapor saturado seco que hay en un vapor húmedo. La humedad de un vapor se define como el porcentaje en peso de líquido saturado que hay en un vapor húmedo. La humedad es el complemento de la calidad. La humedad y la calidad pueden expresarse en porcentaje o como decimal. La calidad se representa con la letra "x" y la humedad con la "y".

Si h_f representa el valor de la entalpía del líquido saturado, h_g representa el valor de la entalpía del vapor saturado y h_{fg} representa la entalpía de vaporización, la entalpía total de un vapor húmedo estará dada por:

$$h = y(h_f) + x(h_g) = (1 - x)h_f + x(h_g);$$

$$h = h_f + x(h_g - h_f) = h_f + xh_{fg}$$

Por lo tanto la calidad está dada por:

$$x = \frac{h - h_f}{h_{fg}}$$

Las demás propiedades se determinan de la misma manera:

$$v = v_f + x(v_{fg})$$

$$u = u_f + xu_{fg}$$

$$s = s_f + xs_{fg}$$

5.2 CALORÍMETROS

Un calorímetro en su forma general es un instrumento que permite evaluar la cantidad de energía que contiene una sustancia, por medio de ellos es posible determinar por ejemplo el poder calorífico de los combustibles. Hablando de vapor es un instrumento que sirve para determinar la calidad de vapor, existen de diversos tipos como estrangulación, de barril, de separación, eléctrico; recibiendo el nombre de acuerdo al principio de operación de cada uno de estos.

5.2.1 CALORÍMETRO DE ESTRANGULACIÓN.

Si una muestra de vapor a alta presión y es estrangulada a una presión menor, entonces, dentro de ciertos límites, se volverá recalentado. En la condición recalentada, podemos medir su presión y su temperatura, conocidas éstas, se puede conocer la entalpía. Si al vapor se le estrangula y a continuación se le expande sin realizar trabajo y suponiendo que no hay pérdidas de calor, la energía total del vapor permanece invariable, la trayectoria de dicho proceso se puede observar en el diagrama de Mollier de la figura 5.2. El vapor se estrangula con una válvula y la expansión se lleva a cabo en una cámara para finalmente llegar a la atmósfera [Faires et.al., 1970].

Un balance de energía lleva a lo siguiente:

$$Q + \frac{Z_1}{J} + \frac{V_1^2}{2gJ} + h_1 = \frac{W}{J} + \frac{Z_2}{J} + \frac{V_2^2}{2gJ} + h_2$$

Donde: $Q = 0$; calor suministrado al calorímetro
 $Z_1 = Z_2$; elevaciones del calorímetro
 $V_1 = V_2$; velocidades antes y después del calorímetro
 h_1 y h_2 ; son las entalpías de estrangulación
 $W = 0$; trabajo realizado

De donde se tendría: $h_1 = h_2$;

Por lo que: $h_1 = h_f + xh_{fg}$

Para calcular h_f y h_{fg} se necesitará la temperatura (T_1) o la presión (P_1) a la entrada del calorímetro, ya que se trata de vapor saturado. Por otro lado h_2 se obtiene de tablas de vapor sobrecalentado a la presión de la salida del calorímetro con su respectiva temperatura.

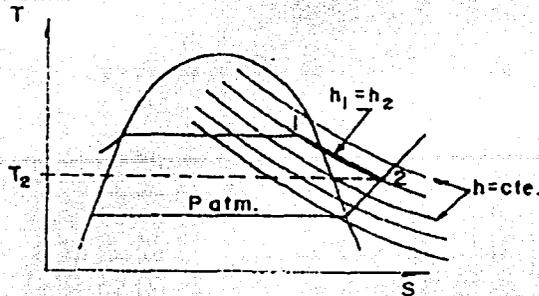


Fig. 5.2 Diagrama de Mollier para el calorímetro de estrangulación.

Estos calorímetros (figura 5.3) son bastante sencillos y con ellos se obtienen buenos resultados para el caso que se requiera vapor saturado o al menos de 94% de calidad [Faires et.al., 1970].

Para mantener las condiciones adiabáticas, el instrumento deberá estar bien aislado, y para que los resultados sean de confianza, el vapor deberá tener cuando menos 10°C de recalentamiento en el calorímetro. La calidad mínima que puede medirse en forma confiable con el calorímetro de estrangulación varía desde 97% hasta 94%, y depende de la presión inicial.

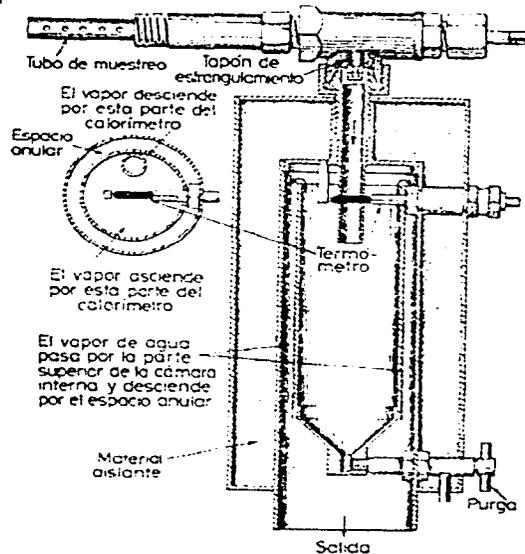


Fig. 5.3 Calorímetro de estrangulación [Faires et al, 1970].

5.2.2 CALORÍMETRO ELÉCTRICO

El principio de operación para este tipo es el sobrecalentamiento, en este calorímetro el vapor húmedo que se obtiene de la caldera se sobrecalienta por medio de una resistencia eléctrica. El calor que la resistencia eléctrica suministra es igual al calor que el vapor absorbe al sobrecalentarse.

$$VI = m_v(h_2 - h_1) = m_v h_2 - h_1;$$

Despejando se tiene:
$$h_1 = h_2 - \frac{VI}{m_v}$$

Donde: V = voltaje medido en un voltímetro
 I = corriente medida en un amperímetro
 m_v = gasto de vapor
 h_2 = se obtiene de tablas de vapor seco teniendo como dato la temperatura (T_2).

Entonces al igual que en los casos anteriores:
$$x = \frac{h_1 - h_f}{h_{fg}}$$

Los resultados que se obtienen con este tipo de calorímetros se consideran suficientemente precisos, como el caso de estrangulación [Severns et.al.1974]. Generalmente este calorímetro se usa en el caso en el que se requiere conocer la calidad del vapor en un punto fijo, ya que debido a la resistencia eléctrica se requiere de una instalación que no es fácil de relocalizar.

5.2.3 CALORÍMETRO DE SEPARACIÓN

Consiste en un depósito por el que se hace pasar el vapor siguiendo un camino mas o menos sinuoso en el que se interponen placas con estrías, salientes y agujeros para facilitar la decantación de las gotas de humedad del vapor, la figura 5.4 muestra el esquema de un equipo de este tipo. La cantidad de condensado que va escurriendo se puede medir por medio de un tubo graduado.

La operación se inicia haciendo pasar el vapor por el calorímetro y abriendo la llave de purga a éste; una vez que se establece un régimen regular, la llave de purga se cierra y el condensado se observa por medio de un tubo de nivel.

A la salida del calorímetro se conecta una manguera cuya extremidad se sumerge en agua fría que contiene un depósito colocado sobre una báscula. Una vez

que la llave de purga se cierra y en esta agua se condensa el vapor que sale del calorímetro [Faires et al, 1970].

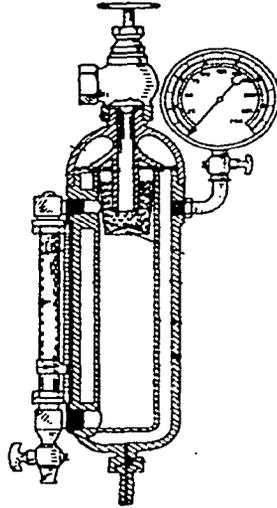


Fig. 5.4 Calorímetro de separación [Faires et al, 1970].

Ya que se ha condensado una cantidad suficiente de vapor o que en el depósito con agua fría se observe tendencia a la evaporación, se suspende la entrada de vapor al calorímetro. Si m_v es el peso del vapor condensado en el agua fría y m_e es el peso del agua recogida en el calorímetro, la calidad esta dada por:

$$x = \frac{m_v}{m_v + m_e}$$

La precisión de este calorímetro no es tan buena a comparación de los anteriores, en experiencia se ha observado que este tipo es recomendable para cuando se requiere conocer la calidad del vapor cuando ésta se estima en valores menores a 90%, y los resultados de este tipo dependen mucho de el operador que realice la medición [Faires et al, 1970].

5.2.4 CALORÍMETRO DE BARRIL

En este caso se utiliza un barril, al cual se le suministran $\frac{3}{4}$ partes de agua aproximadamente; después se le agrega vapor hasta el momento en el cual el agua del barril comienza a desprender vapor. Para hacer esta práctica se pesa primero el barril

vacío, después el barril con agua y se toma la temperatura del agua; al final se pesa el barril con el agua y el vapor condensado y se toma de nuevo la temperatura.

Asignemos las siguientes variables para cada caso.

W_1 – Peso del barril vacío.

W_2 – Peso del barril con agua

W_3 – Peso del barril con agua y vapor condensado.

T_1 – Temperatura del agua

T_2 – Temperatura del agua mas el condensado

$$m_a = W_2 - W_1 \quad \text{cantidad de agua}$$

$$m_v = W_3 - W_2 \quad \text{cantidad de vapor}$$

$$m_{av} = W_3 - W_1 \quad \text{cantidad de agua y vapor condensado}$$

Realizando un balance de energías y despejando la entalpía de vapor:

$$h_v = \frac{m_{av}h_{av} - m_a h_a}{m_v}$$

Conociendo el valor de h_v podemos determinar la calidad del vapor de la siguiente manera:

$$X = \frac{h_v - h_f}{h_{fg}}$$

Este tipo de calorímetro no es muy usual, ya que debido a las pérdidas se obtienen calidades no muy exactas, pero se usan en lugares donde lo que tiene importancia es la comparación de calidades de vapor [Severns et.al., 1974].

5.3 DISEÑO DEL EQUIPO DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL VAPOR.

Las bases que se tomaron para realizar la construcción del calorímetro son las siguientes. Se muestran a continuación las condiciones que debe cumplir nuestro calorímetro, así como la forma en que se tomó la decisión del tipo de instrumento a construir.

5.3.1 CONDICIONES QUE DEBE CUMPLIR EL CALORÍMETRO.

El objetivo de incrementar la calidad del vapor para la geotermia, es darle suficiente energía para llevarlo a su estado de vapor saturado, por lo que se busca determinar calidades entre 95 y 100 %. Entonces las características para determinar que tipo de calorímetro se iba a construir son las siguientes:

- o Precisión para determinar calidad entre 95 y 100%.
- o Economía en su construcción.
- o Facilidad de instalación.
- o Vida útil prolongada.
- o Facilidad de operación.

La primera característica a evaluar para determinar el tipo de calorímetro a construir ya se explicó en renglones anteriores, pero para ampliar la explicación, se tiene que, al suponer que se obtengan calidades demasiado bajas, (alrededor de 40%) sabemos que por separación o a través de una trampa de vapor podemos determinar la calidad o tener una idea de esta. Es por ello que al suponer que nuestro sistema debe operar con una calidad de alrededor de 100%, se necesita un instrumento capaz de medir esta cantidad.

Es necesario que el método de construcción sea económico ya que de otra manera, una opción más confiable, sería comprarlo y verificar los beneficios que el proveedor nos ofrezca.

Debe ser fácil de instalar para que su uso tenga aplicación en diversos puntos, o localizaciones dentro de la planta, y así aumentar su versatilidad como instrumento de medición. Por otro lado se debe buscar que al cambiarlo de lugar donde se quiere realizar la medición, el instrumento no sufra desperfectos o daños por hacer este tipo de movimientos.

Se busca que su vida útil sea prolongada, ya que será un instrumento muy útil durante la operación de la planta solar del Instituto de Ingeniería, además de que, recordemos que estará operando con una salmuera muy agresiva en cuanto a niveles de corrosión se refiere. Por otro lado si estamos buscando que el instrumento sea económico, y su vida útil es tan corta que se tiene que fabricar otro instrumento igual en un tiempo muy corto, la búsqueda de un instrumento económico no tendrá sentido.

En lo que se refiere a facilidad de operación, se busca que no se tengan demasiadas complicaciones en el momento de realizar la medición ya que esto aumenta la probabilidad de cometer errores durante la medición producidos por errores humanos, recordando también que habrá ocasiones en las que un operador tendrá que hacer las mediciones y en la medida que el sistema sea mas complicado aumentara la tendencia

de que el operador aborrezca el procedimiento y por lo tanto las mediciones sean erróneas.

5.3.2 TABLA DE DECISIONES

El siguiente cuadro es una herramienta que ayudará a tomar una decisión acerca de cual es tipo de calorímetro mas acorde, o que reúne de manera mas acertada las necesidades de el calorímetro a usar.

Ya se eligieron entonces las características que debe cumplir el calorímetro, estas aunque son las más importantes alguna tiene mayor importancia que otra, por lo tanto es necesario ponderarlas. Debajo de cada característica aparece un valor de importancia con respecto a las demás, que al sumarse se obtiene un valor de diez.

Dichas características se evalúan para cada calorímetro otorgándoles una calificación de 0 a 1, (numero subrayado que se encuentra en la esquina superior derecha de cada cuadro) que al multiplicarlas por la ponderación de cada característica encontramos una calificación ponderada para cada calorímetro para dicha característica. Finalmente al sumar los respectivos renglones de cada columna se obtiene una calificación total para cada calorímetro, la cual nos ayudará a decidir por el mejor.

<i>Tipo de Calorímetro</i>	<i>Estrangulación</i>	<i>Eléctrico</i>	<i>Separación</i>	<i>Barril</i>	<i>Láser</i>
Característica					
Precisión de medición	<u>.95</u>	<u>.95</u>	<u>.80</u>	<u>.80</u>	<u>.99</u>
3	2.85	2.85	2.4	2.4	2.97
Economía de construcción	<u>.80</u>	<u>.60</u>	<u>.65</u>	<u>.65</u>	<u>.10</u>
2	1.6	1.2	1.3	1.3	.2
Facilidad de instalación	<u>.90</u>	<u>.50</u>	<u>.70</u>	<u>.70</u>	<u>.60</u>
2	1.8	1	1.4	1.4	1.2
Vida Útil	<u>.50</u>	<u>.30</u>	<u>.50</u>	<u>.50</u>	<u>.70</u>
1.5	.75	.45	.75	.75	1.05
Facilidad de Operación	<u>.80</u>	<u>.70</u>	<u>.80</u>	<u>.70</u>	<u>.50</u>
1.5	1.2	1.05	1.2	1.05	.75
TOTAL DE CALIFICACIONES	8.2	6.55	7.05	6.9	6.17

De lo anterior podemos observar que el calorímetro mas adecuado para las necesidades antes mencionadas es el calorímetro de estrangulación.

5.3.3 DISEÑO DEL CALORÍMETRO

Se inició el diseño con base en las condiciones de generación de vapor, que son 12 kg/cm^2 generando vapor saturado. Se debe estrangular el vapor hasta presión atmosférica, el objetivo es tener la cantidad menor de pérdidas durante el cambio de presión. Haciendo un balance energético de la Primera ley se obtiene que las velocidades del vapor en el tubo y a la salida de este deben mantenerse iguales para que la entalpía sea la misma. Entonces si después de la válvula el vapor ya se expandió tiene un volumen específico de $2.165 \text{ m}^3/\text{kg}$, y la masa de vapor en estado líquido que esta circulando es $5.68 \text{ kg}/\text{min}$, por lo que el flujo volumétrico será de $12.3 \text{ m}^3/\text{min}$, es decir de $0.205 \text{ m}^3/\text{s}$ y si se sabe que el diámetro en esta posición es de 2.54 cm , la velocidad será de 404.35 m/s . Estas condiciones se pueden observar en el diagrama de la figura 5.5. El objetivo será mantener esta velocidad, lo cual va a ocurrir únicamente cuando se mantengan las condiciones de dimensiones de tubería del punto anterior.

Debido a esto, y suponiendo que los inconvenientes por no fabricarlo bajo estas dimensiones serán: error en la medición debido a una variación de presión, fuerzas de reacción en los cilindros del calorímetro por variación instantánea de la velocidad del vapor, y por tanto disminución en la confiabilidad del equipo; se establecerán las dimensiones de los cilindros a usar y posteriormente se evaluarán los errores y funcionamiento.

Las dimensiones a usar para el cilindro interno del calorímetro son: diámetro de 0.0508 m (2 in.) y longitud de 0.1016 m (4 in.), bajo estas dimensiones la velocidad del vapor dentro del calorímetro será de 101.35 m/s . Suponiendo que esta caída de velocidad involucra pérdidas en la energía interna del fluido por causa de disminución de energía cinética, y la diferencia entre estas velocidades la suponemos como la pérdida neta, ésta estará dada por un valor alrededor de $5.1 \text{ kJ}/\text{kg}$.

Suponiendo que para la presión para la cual se realizó el diseño de 12 kg/cm^2 , se requieren calidades de 90%, las entalpías que se deben determinar estarán alrededor de valores de $2584 \text{ kJ}/\text{kg}$, el dato de pérdida de energía interna ($5.1 \text{ kJ}/\text{kg}$) representa un error de 0.197% en la medición realizada por este instrumento.

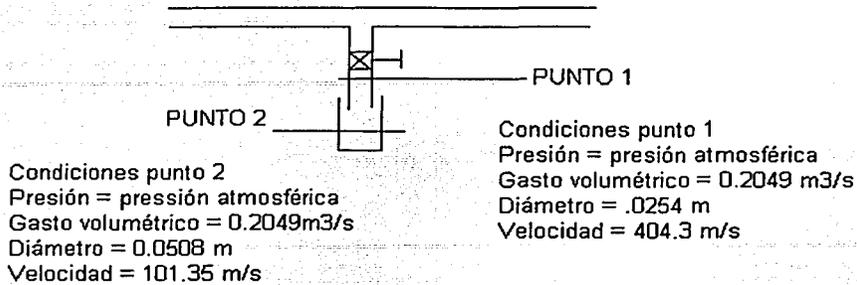


Fig. 5.5 condiciones del vapor durante la medición de la calidad

Este cilindro se encuentra dentro de otro cilindro cuyo diámetro es de 0.1016 m (4 in.) y de longitud de 0.2032 m (8 in). El interior está sujeto al exterior por cuatro soportes de 0.0254 m (1 in) de ancho y 0.00635 m (¼ in) de espesor. Además hay un tubo que une a dos barrenos de los cilindros para poder introducir el medidor de temperatura del vapor.

El cilindro exterior tiene una tapa a la cual está unido el tubo de diámetro de 0.0254 m (1 in) por donde se introduce el vapor al cilindro interior, y a la distancia de 0.0254 m (1 in) se encuentra el sensor donde se registra la temperatura del vapor.

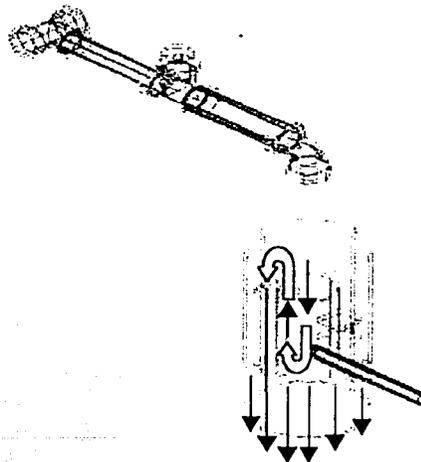


Fig. 5.6 Diagrama del calorímetro fabricado .

El tubo con que se toma la muestra y que se introduce en la tubería principal, deberá estar tan lejos como sea posible corriente abajo de los codos y las válvulas para que la muestra sea representativa. El vapor de agua fluye hacia la cámara interna. Un termómetro indica la temperatura. La presión es prácticamente la atmosférica. Al salir de la cámara interna por la parte superior, dicho vapor vuelve hacia abajo por el interior del espacio anular y sale del instrumento por el fondo. El vapor caliente que rodea la cámara interna, constituye una ayuda para el aislamiento que evita las pérdidas por radiación. Por tanto el aislamiento térmico usado es un cilindro de 1 de pulgada de fibra de vidrio, no representada en el esquema (fig 5.6).

5.4 CONSTRUCCIÓN DEL CALORÍMETRO

Como apoyo para la realización del diseño del calorímetro se hizo uso del software llamado Auto Cad R-14, y los planos realizados con dicho programa y que se usaron para la construcción del calorímetro se muestran en el apéndice B que se encuentra al final de este trabajo.

Para la construcción del calorímetro se usó acero inoxidable SAE 304, se consiguió tubo de dicho material a las diámetros antes mencionados de tal forma que solo se realizara el corte para la longitud requerida. Para poder obtener la longitud deseada se uso un torno convencional y se aprovecho para cilindrar para disminuir el espesor del tubo en el caso del cilindro grande, ya que el espesor estaba excedido en 0.3175 cm. lo cual hacia muy pesado el calorímetro. De la misma manera se realizó el corte del cilindro interior para obtener sus dimensiones requeridas, así como los soportes que sujetan o unen a los dos cilindros.

Después de haber adquirido el material necesario se prosiguió a torneear la tapa, ya que había que barrenar para obtener el agujero central de 2.54 cm de diámetro que aloja al tubo de alimentación de vapor. Después de haber barrenado se torneó para obtener la ceja que acopla con el cilindro exterior, éste acoplamiento se iba a realizar para que la unión entre los elementos fuera a base de presión para poder desarmar el instrumento en caso necesario desde el punto de vista de mantenimiento y funcionamiento. Para garantizar que la tapa no se desprenda del cilindro se barrenó para poder alojar a cuatro tornillos opresores, distribuidos en forma perimetral y separados cada 90°. A excepción de esta unión las uniones restantes fueron realizadas por medio de soldadura tipo mig (metal gas inerte).

Las siguientes imágenes muestran el instrumento después de su construcción.

En la figura 5.7 se puede observar el tubo de entrada de vapor, la tapa del cilindro exterior, el cilindro exterior, el medidor de temperatura, y un accesorio que se tuvo que instalar después de haber hecho algunas pruebas y que no se tomó en cuenta durante el diseño que es el purga de condensados.

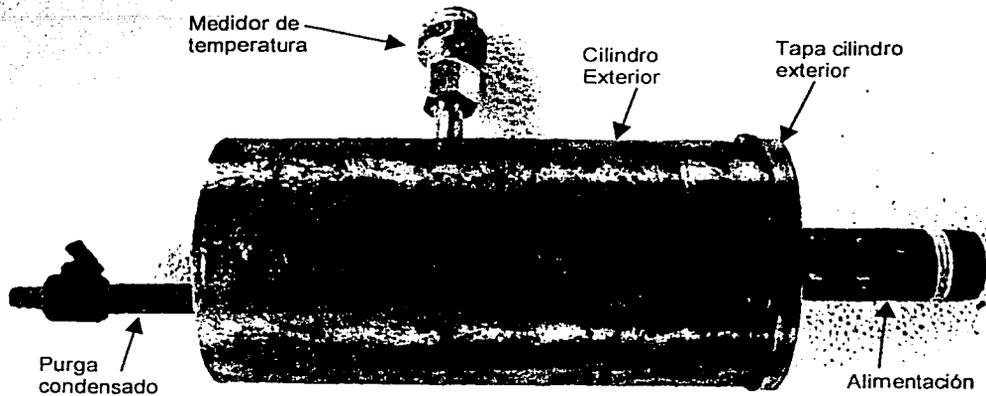


Fig. 5.7 Vista exterior del calorímetro de estrangulación

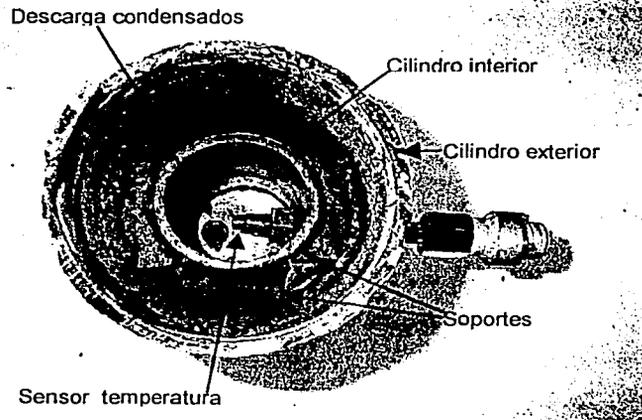


Fig. 5.8 Vista interior del calorímetro.

En esta fotografía (fig 5.8) podemos observar la constitución interna del calorímetro formada por el cilindro interior, sensor de temperatura, soportes y descarga de condensados.

La siguiente foto (fig 5.9) muestra la colocación final del calorímetro forrado ya con su aislamiento térmico, y en el lugar donde se realizaron las mediciones de calidad del vapor.

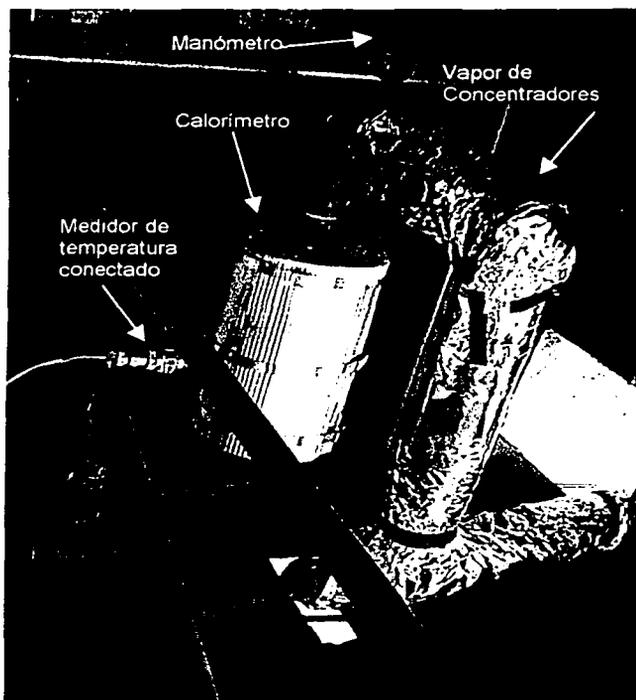


Fig 5.9 Instalación del Calorímetro en Planta Solar

6.- PRUEBAS EXPERIMENTALES DE MEDICIÓN DE CALIDAD Y CONFIGURACIÓN RECOMENDADA

6.1 MEDICION DE CALIDAD DE VAPOR DE AGUA

Habiendo construido el calorímetro para poder medir la calidad del vapor se procedió a realizar la medición de dicha propiedad. Las características del sistema solar de generación directa de vapor empleado son las siguientes: sistema de concentración solar de canal parabólico situado en una latitud de $19^{\circ} 22'$ norte con orientación Este – Oeste, el modulo de concentradores tiene una apertura de 2.5 m, 13.6 m de longitud y 62.5 cm de distancia focal, con superficie reflejante de papel aluminio con reflejancia cercana al 88%, de la marca 3M.

6.1.1 PROCESO PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD

Las pruebas que se realizaron se dividieron en dos partes, la primer parte fue medir la calidad de vapor de agua generado por la planta solar. Con base en la experiencia de tesis anteriores realizadas en dicha planta para la generación de vapor, se determinó hacer uso de cuatro módulos de concentradores de canal parabólico, y con dicho equipo era suficiente para generar vapor continuamente.

El proceso para llevar a cabo la prueba de medición de calidad de vapor es el siguiente: Se enfocaban el tubo absorbedor con respecto a los rayos reflejados por los concentradores y posteriormente se introducía agua para poder obtener vapor. Después de cierto tiempo y hasta que se alcanzaba determinada presión y temperatura se abría la válvula de salida para hacer pasar el vapor al calorímetro.

Una vez alcanzado el estado deseado de presión y temperatura (14 kg/cm^2 , y 150°C aproximadamente), y al abrir la válvula se arrancaba la bomba de alimentación para mantener la generación de vapor a esas condiciones como un estado permanente.

Después de abrir la válvula y hacer pasar vapor al calorímetro, se tomaba el registro de la lectura de temperatura indicada por el medidor, y su correspondiente lectura de presión en un manómetro localizado al final del último módulo de concentradores. Este registro de temperatura, debía ser un valor alcanzado después de que el proceso alcanzara un estado estable.

El realizar la medición de la calidad del vapor obtenido a partir de agua tenía dos intenciones primordiales. La primera era evaluar el funcionamiento de dicho instrumento y verificar la veracidad del mismo, como segundo objetivo se pretendía cuantificar la calidad del vapor obtenido a partir de agua, en la planta solar del Instituto de Ingeniería.

La segunda parte de experimentación, la cual representa uno de los objetivos primordiales de este trabajo era, la evaluación de la calidad del vapor obtenido a partir de salmuera geotérmica. El proceso que se siguió para llevar a cabo la medición en este caso fue el mismo que se realizó en el caso de la obtención de vapor a partir de agua. Solamente que en este caso se tuvo que realizar la preparación de la salmuera. Como el proyecto a realizar es en pozos geotérmicos de Cerro Prieto en Mexicali, basados en la composición de la salmuera de este lugar, que es [Almanza et al., 1994]:

Salmuera de Cerro Prieto México
Masa en Porcentaje

NaCl	2.0324
KCl	0.3650
CaCl ₂	0.1184
SiO ₂	0.0918
LiCl	0.0138
H ₃ BO ₃	0.0084

MgCl ₂	0.0079
Otros	0.0067
<u>Agua</u>	<u>97.3556</u>
Total	100.000

Como se puede observar de esta composición en peso, el compuesto con mayor porcentaje es cloruro de sodio, además de que es la sal más agresiva a los metales de todas las presentes en la salmuera. Como no era posible tener salmuera de Cerro Prieto, se decidió hacer la simulación de la salmuera preparando una mezcla similar a la que se tiene en teoría. Se preparó con agua y cloruro de sodio bajo los porcentajes en peso que se tienen. Debido a que se tiene en la planta solar un tinaco de un volumen de 1100 litros, suponiendo que este volumen en peso sería el peso total de la mezcla entonces la masa total sería de 1099.56 kg, con esta masa y el porcentaje en peso del cloruro de sodio, la mezcla debe tener 29.1kg de cloruro de sodio y de agua 1070.48kg equivalente a 1070.9 litros de agua.

El agua usada para preparar la salmuera fue agua suavizada con una densidad de 999.6 kg/m³. El objetivo de haber usado agua suavizada fue para mantener la concentración de sal prevista en nuestra salmuera, y evitar aumentarla con las concentraciones obtenidas del agua potable, las cuales no conocemos.

6.1.2 OBSERVACIONES Y RESULTADOS DE LA MEDICIÓN

6.1.2.1 PARA EL VAPOR OBTENIDO A PARTIR DE AGUA

En general cuando se lograban las condiciones requeridas y después de abrir la válvula del calorímetro, en el momento de tomar la lectura de la temperatura registrada por el medidor de temperatura, esta variaba mucho y generalmente iba en aumento, hasta que llegaba un momento en el cual se estabilizaba esta temperatura y lográbamos obtener una lectura en estado estable.

Durante esta fase de experimentación se tuvieron problemas de falta de vapor, ya que se terminaba el vapor generado antes de lograr estabilizar la temperatura. El problema se solucionó por medio de dos acciones, la primera y mas apremiante fue cambiar los espejos de los concentradores ya que se encontraban dañados por lo que la eficiencia de concentración se encontraba demasiado baja, y no se alcanzaba a captar la energía necesaria para generar vapor de manera rápida. La segunda acción a tomar fue la modificación de la instalación de la tubería para poder instalar un precalentador,

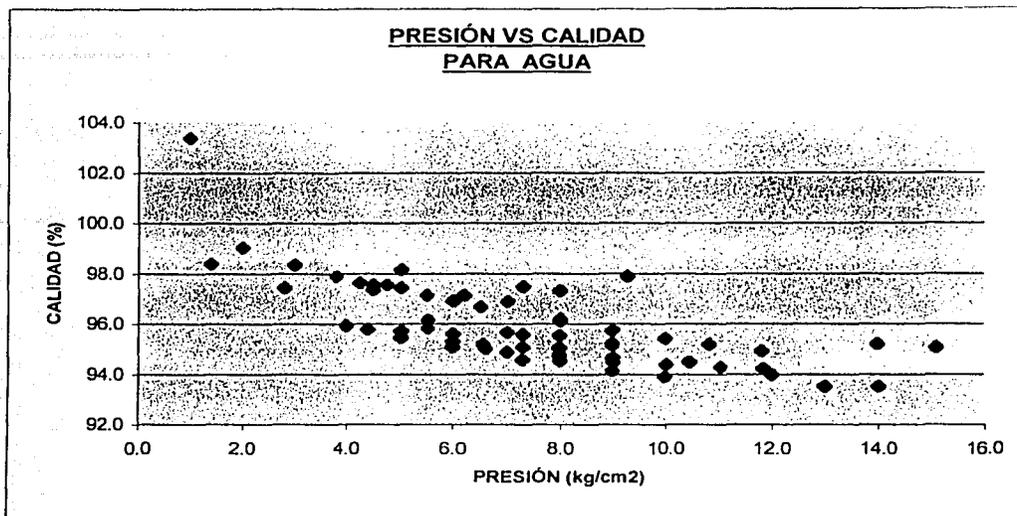
por lo que estas acciones tomaron tiempo y se interrumpieron las mediciones para poder dar mantenimiento a los concentradores.

Después de haber realizado la primer acción, es decir reparar los espejos de los concentradores, se prosiguió con la generación de vapor para hacer la medición de la calidad de vapor. Bajo las nuevas condiciones (espejos nuevos) y manteniendo los mismos parámetros la generación de vapor se volvió mas rápida, por lo que el tiempo en alcanzar las condiciones deseadas de presión y temperatura era mucho mas corto.

Posteriormente ya que el equipo necesario para precalentar el agua de alimentación estaba listo se procedió a instalar, y a generar vapor logrando ahora introducir agua a una temperatura mucho mayor a la temperatura ambiente obteniendo así mejores resultados. Debido a esto pudimos generar vapor continuamente, con esto medir la calidad de vapor a diversos intervalos de tiempo, es decir, después de abrir la válvula y hacer pasar vapor al calorímetro y logrando estabilizar la temperatura se realizaban las mediciones. La variación de la temperatura del calorímetro y por lo tanto de la calidad del vapor, ahora se debía a que dentro del sistema ocurrían transitorios como la variación de temperatura y presión debido a la disminución de la radiación captada por la interferencia de nubes, desenfoque de los concentradores durante la realización de la prueba, variación del flujo de agua de alimentación por aumento de presión en los absorbedores, entre otros.

Esta variación se puede observar en las tablas de resultados obtenidos que se encuentran el apéndice C al final de este trabajo.

Por lo tanto para el caso de generación de vapor a partir de agua, la calidad promedio que se puede obtener en la planta solar es de 95.9%. Para presiones altas entre 9 y 14 kg/cm² la calidad promedio es de 94.8%, para presiones intermedias entre 5 menores de 9 kg/cm² la calidad promedio es de 95.9%, y para el caso de presiones menores de 5 kg/cm² la calidad promedio es de 98%. Lo cual se puede explicar de la siguiente manera. Cuando se realizaba la prueba, y se abría la válvula para hacer pasar vapor al calorímetro (cuando la presión alcanzaba valores mas altos), el contenido en el último tubo concentrador era de vapor con baja calidad, en el caso del vapor contenido en los absorbedores intermedios a medida que recorría los absorbedores restantes, este iba adquiriendo mayor energía y aumentando su calidad.



Gráfica 6.1 Calidad del vapor obtenida
en pruebas con agua

Existía todavía un problema, que la bomba que alimentaba el flujo de agua no era capaz de vencer las presiones de los absorbedores, por lo que en un momento dado esta se apagaba no podía introducir agua por lo tanto la presión disminuía y la prueba se tenía que volver a iniciar.

La gráfica anterior (grafica 6.1) es la representación de todos los resultados obtenidos para la medición de la calidad del vapor de agua, y se pueden observar los resultados mencionados anteriormente.

Con dichos resultados se cumple uno de los objetivos de hacer la medición de la calidad del vapor a partir de agua. El otro objetivo por el cual se realizó esta experimentación era la validación de los resultados arrojados por el calorímetro en cuanto a su funcionamiento. Haciendo un análisis estadístico a partir de los datos obtenidos de la experimentación con agua, y tomando datos de condiciones iguales (para los cuales se esperaba que la calidad fuera la misma), se observan valores de desviaciones estándar relativamente bajas y en intervalos de 0.5 a 1.2, lo cual refleja que los datos se encuentran en un nivel de confiabilidad alto (en relación a los errores cometidos durante la experimentación), y la calidad en general varía en ± 0.75 del valor obtenido.

6.1.2.2 PARA EL VAPOR OBTENIDO A PARTIR DE LA SALMUERA

Debido a que se pudieron obtener resultados satisfactorios con el instrumento para la medición de la calidad del vapor de agua, se siguió con la generación de vapor a partir de salmuera.

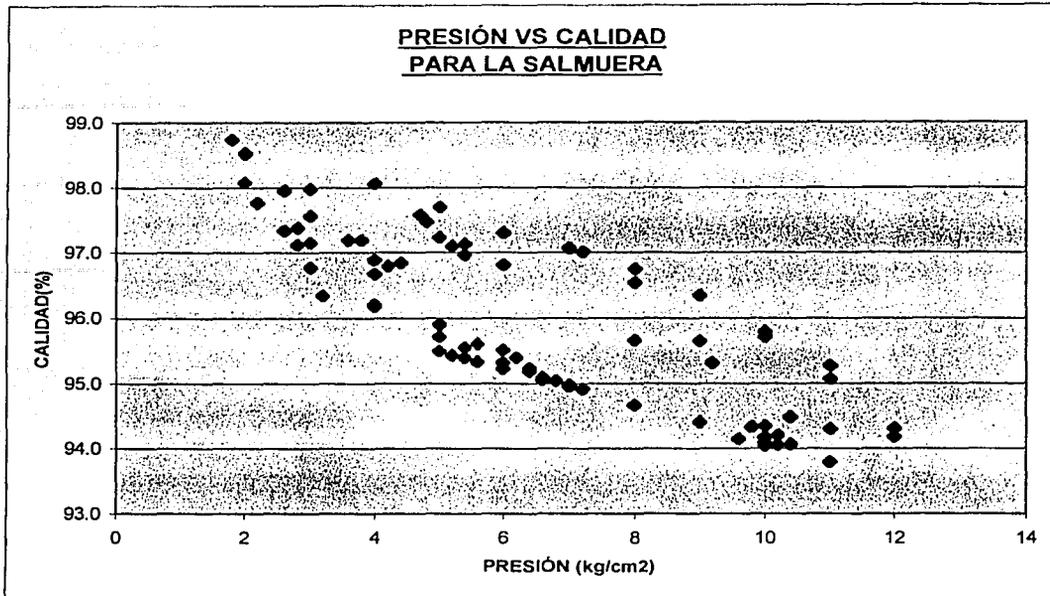
Las pruebas que se realizaron fueron similares a las realizadas con agua; se introducía salmuera a los absorbedores se enfocaban estos para concentrar radiación hasta obtener aproximadamente 14 kg/cm² de presión y aproximadamente 190°C de temperatura. Llegando a este punto se abría la válvula para pasar vapor al calorímetro y se esperaba a que se estabilizara la temperatura, para poder registrar el valor de un estado estable.

El problema que nos impedía continuar con la prueba era que disminuía la presión de manera considerable debido a que no había salmuera de alimentación, por el problema de la bomba antes mencionado. A pesar de esto, en diversas pruebas se logro realizar la medición de calidad para una presión dada y constante en un intervalo de tiempo considerable, operando la bomba de alimentación a cierto régimen.

La calidad promedio del vapor obtenido a partir de la salmuera en este sistema es de 96% , se puede hablar de la misma calidad obtenida para vapor obtenido a partir de agua. En el caso de los intervalos analizados para el intervalo de presión alta ($p > 9 \text{ kg/cm}^2$) la calidad promedio de este es de 94.8%, para presiones intermedias mayores de 5 y menores de 9 kg/cm² la calidad promedio es de 95.8%, y para el caso de presiones menores de 5 kg/cm² la calidad promedio es de 97.4%. El que la calidad aumente conforme disminuye la presión, tiene la misma explicación que para el caso de agua.

Como se puede observar respectivamente en los intervalos de presión la calidad para el caso de salmuera es ligeramente menor que para el caso de vapor a partir de agua. La parte restante de salmuera en estado líquido estaba saturada de sal en forma sólida, y lo observado por este efecto se menciona líneas abajo.

El gráfico 6.2 muestra los resultados obtenidos de todas las mediciones realizadas para la salmuera, y se pueden observar los resultados antes mencionados.



Gráfica 6.2 Calidad del vapor obtenida
en pruebas con salmuera

Desde luego hubo diferencias bastante notables para la generación de vapor a partir de salmuera. Estas diferencias en particular son dos principalmente. Primero el tiempo necesario para generar vapor a partir de salmuera es considerablemente menor que el tiempo para generar vapor a partir de agua potable, por esta razón es que se pudieron realizar mas pruebas para la salmuera que para el agua, y además de que se pudieron desechar pruebas en las que por alguna razón no se lograban obtener presiones o temperaturas iniciales como las que se requerían.

La segunda diferencia consistía en que en uniones en las cuales existía alguna fuga por pequeña que fuera se fugaba la sal que se separaba del agua, al haber un cambio de fase y debido a que la temperatura de fusión del cloruro de sodio es demasiado alta (alrededor de 1465°C), la sal en su estado sólido y movida por las altas presiones en los absorbedores era empujada al exterior a través de algún orificio que encontraba, estos orificios eran pequeñas fugas en las uniones de los tubos por donde la sal era expulsada. Esta sal se acumulaba en la parte exterior de los tubos provocando una corrosión excesiva en la tubería de la planta.

Durante las primeras pruebas realizadas con salmuera se observó que el flujo de líquido que salía de los absorbedores (fluido que no alcanzaba a evaporarse) tenía un color negro, dicho color se debía a que las partículas sólidas de sal golpeaban las paredes del tubo absorbedor, el cual se había usado para pruebas de generación de vapor de aceite térmico, y por medio del arrastre de los sólidos se limpiaban los restos de este aceite contenido en los tubos.

Con base en los resultados obtenidos se puede decir que dos de los objetivos planteados para esta tesis se han cubierto, como son , primero conocer la calidad del vapor generado por la planta solar del Instituto de Ingeniería, y por otra parte, evaluar la factibilidad de generar vapor de agua a partir de salmuera y medir la calidad de este vapor generado por medio de energía solar, lo cual ha quedado demostrado que es posible realizar, así como, que la calidad del vapor generado a partir de agua es igual a la calidad del vapor generado a partir de salmuera, con sus problemas asociados respectivamente.

6.2 CONFIGURACIÓN ÓPTIMA DEL SISTEMA HÍBRIDO SOLAR – GEOTÉRMICO

Dado que por medio de la experimentación anterior se comprobó que es posible obtener vapor con alta calidad a partir de salmuera geotérmica, es factible recomendar un ciclo óptimo desde el punto de vista termodinámico de los anteriormente analizados.

Desde este punto de vista la configuración óptima que se puede recomendar es la que se ha llamado concentradores después del separador con dos turbinas, dicha configuración posee la eficiencia de segunda ley mas alta, una eficiencia de primera ley que no es la mas alta, pero que mejora sustancialmente con respecto al caso actual.

A continuación se puede observar la configuración mencionada, y las características de la misma.

<i>Característica</i>	<i>Energía generada</i>	<i>Area de espejos</i>	<i>Area por ton. de vapor m²/(ton/h)</i>	<i>Eficiencia 1ª ley</i>	<i>Eficiencia 2ª ley</i>	<i>Potencial Energético</i>	<i>Factor de Aprovechamiento del pozo</i>
<i>Sistema</i>	<i>kW</i>	<i>ha</i>	<i>m²/(ton/h)</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>KWe/(ton/h)</i>	<i>%</i>
Concentradores Después del Separador.	53,900	20.36	1107.81	13.89	97.62	90.78	62

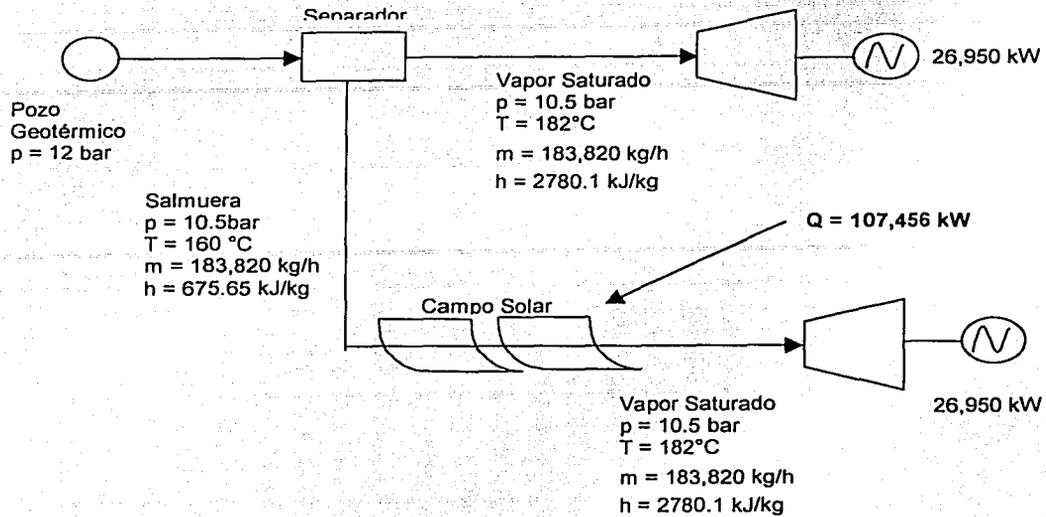


Fig. 6.3 Concentradores después del separador.

El hecho de haber escogido la presente configuración como la mas aplicable es porque hasta el momento, aunque se identificaron los problemas asociados con el aumento en la concentración de cloruro de sodio en la salmuera restante, todavía no se tienen estudiados completamente dichos problemas.

Se tienen ciertas desventajas en comparación con las demás configuraciones propuestas. Por ejemplo el área necesaria por tonelada de vapor para dicha configuración es la mayor, y el potencial energético no es el mejor.

El criterio de selección de configuración podría cambiar si un estudio realizado a los problemas generados por aumento de concentración de cloruro de sodio, y su correspondiente arrastre de sólidos no indicara la existencia de problemas mas graves de los que se observaron en el presente trabajo.

Tomando en cuenta esto sería posible recomendar la configuración de concentradores antes del separador, por medio de la cual se obtiene vapor necesario para satisfacer la demanda de tres turbinas por medio del aumento de la calidad de la mezcla. Esta configuración presenta los mejores valores para las características evaluadas a excepción de la eficacia de segunda ley, cuyo valor es de 90%, que aunque es bajo no es tan malo (a comparación de ciclos que están operando actualmente).

7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Con base en los objetivos planteados al inicio de este trabajo las conclusiones a las que se pueden llegar con el desarrollo de este trabajo, son las siguientes:

- Fue posible construir un calorímetro de estrangulamiento por medio del cual se puede evaluar la calidad del vapor obtenido a partir de agua. Dicho calorímetro se construyó con el menor costo (económico) posible, y se lograron obtener mediciones confiables con el instrumento fabricado.
- Con base en la medición de la calidad del vapor obtenido a partir del agua, se puede determinar que el valor real de dicha medición se encuentra en un intervalo de ± 0.75 del valor leído.
- La calidad de vapor a partir de agua obtenido en la planta solar del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M., toma un valor aproximado de $95.9\% \pm 0.75\%$.
- Es posible obtener vapor con una calidad del $96\% \pm 0.75\%$ a partir de salmuera geotérmica, con una concentración de cloruro de sodio de 2.03%.
- La parte de salmuera que permanece en estado líquido al generarse vapor a partir de esta, aumenta su concentración de cloruro de sodio, y en ocasiones contiene gran porción de sólidos arrastrados que pudieran incrustarse en las tuberías.

- Debido a las altas concentraciones de cloruro de sodio que contiene la porción líquida restante después de haber realizado el aumento de calidad, la tubería y el equipo que se encuentra en contacto con esta, está sujeta a un ambiente extremadamente corrosivo.
- Es posible lograr dicho aumento de calidad de vapor a partir de salmuera geotérmica con energía solar a partir de concentradores solares de canal parabólico.
- Actualmente se tienen las condiciones tecnológicas a nivel comercial para la instalación de una planta solar, haciendo uso de concentradores solares de canal parabólico tipo LS-II, los cuales se encuentran operando de manera eficiente en plantas solares de otros países.
- Con base en las conclusiones arriba mencionadas se puede afirmar que, es posible acoplar un sistema solar a un sistema geotérmico como el de Cerro Prieto en Mexicali, y obtener un sistema híbrido Solar – Geotérmico.
- Dicho sistema híbrido aumentará el potencial energético de los pozos de geotermia debido a un aumento de la calidad del vapor por medio de energía solar.
- Fue posible hacer la recomendación de una configuración para el sistema híbrido solar – geotérmico, bajo un punto de vista termodinámicamente aceptable, teniendo en cuenta los problemas asociados con la salmuera.

RECOMENDACIONES

Con base en las actividades realizadas en este trabajo y los problemas observados es posible hacer las siguientes recomendaciones:

- Es necesario obtener los valores de concentración de cloruro de sodio para poder realizar un análisis más confiable de los ciclos propuestos.
- En caso de que la concentración de cloruro de sodio contenida en la salmuera obtenida después de la separación, sea mayor a los límites para los cuales se consideran sus propiedades termodinámicas como las del agua, obtener teórica o experimentalmente las propiedades termodinámicas para la salmuera
- Hacer el estudio de un ciclo híbrido geotérmico – solar en el cual se realice la generación de vapor por medio solar a través de un aceite térmico como fluido de transferencia de calor, y este transfiera la energía térmica a la salmuera por

medio de un intercambiador de calor, así como se realiza en las plantas SEGS. Esto con el objeto de disminuir los problemas de corrosión que se puedan presentar en la instalación solar, y tratar de disminuir dichos problemas en la parte geotérmica.

- Estudiar el comportamiento de la salmuera durante el incremento de la calidad de vapor por medio de un campo solar, de tal forma que se cuantifiquen los problemas asociados a esta aplicación debido al aumento en la concentración de sal en el líquido obtenido.
- Evaluar teórica y experimentalmente los coeficientes de transferencia de calor y su comportamiento debido a incrustaciones en las paredes internas de los tubos absorbedores, durante la generación de vapor a partir de salmuera geotérmica, principalmente el sílice. Esta incrustación es la mas común en Cerro Prieto.

APENDICE A

***TABLAS DE CALIDAD DE VAPOR DE
LA PLANTA DE GEOTERMIA DE
CERRO PRIETO, OBTENIDAS DE
CFE.***

APENDICE A
RELACION AGUA – VAPOR EN CERRO PRIETO

Los siguientes cuadros muestran información proporcionada por Comisión Federal de Electricidad, en relación a datos obtenidos a partir de mediciones realizadas en diferentes pozos, para obtener la cantidad de vapor que se obtiene en la mezcla extraída de dichos pozos.

DATOS OTORGADOS POR C.F.E. DE LOS POZOS DE CERRO PRIETO											
VAPOR	AGUA	MEZCLA	Relación	ENTALPIA	TEMP.	PRESIÓN DEL SEPARADOR			PRESIÓN DEL POZO		
			Agua/Vapor	kCal/kg	°C	PSIG	bar	MPa	PSIG	bar	MPa
Ton/ hr.											
20.6	70	90.6	3.40	280.2	268	91	6.27	0.627	430	29.65	2.965
44	147.7	191.7	3.36	283	273	97	6.69	0.669	265	18.27	1.827
48	113.1	161.1	2.36	316.3	296	96	6.62	0.662	105	7.24	0.724
62	62.7	124.7	1.01	414.9	357	103	7.10	0.710	%	0.00	0.000
9.9	19.1	29	1.93	337.5	312	94	6.48	0.648	95	6.55	0.655
52.4	111.7	164.1	2.13	327.8	304	99	6.83	0.683	123	8.48	0.848
55	40.6	95.6	0.74	456.5	371	114	7.86	0.786	%	0.00	0.000
104.7	112.6	217.3	1.08	411.8	356	119	8.20	0.820	930	64.12	6.412
71.3	162.3	233.6	2.28	323.9	302	110	7.58	0.758	125	8.62	0.862
38.1	105.8	143.9	2.78	304.2	287	110	7.58	0.758	112	7.72	0.772
14.8	31.7	46.5	2.14	328.9	305	102	7.03	0.703	103	7.10	0.710
53.1	72.8	125.9	1.37	382.3	340	107	7.38	0.738	128	8.83	0.883
15.5	31.7	47.2	2.05	330.8	307	93	6.41	0.641	110	7.58	0.758
43.7	161.6	205.3	3.70	274.9	263	97	6.69	0.669	180	12.41	1.241
4.8	12.9	17.7	2.69	305.3	288	106	7.31	0.731	116	8.00	0.800
39.1	120.4	159.5	3.08	291.4	277	99	6.83	0.683	100	6.89	0.689
49.6	113.1	162.7	2.28	319.7	299	96	6.62	0.662	107	7.38	0.738
24.6	59.5	84.1	2.42	312.4	293	92	6.34	0.634	97	6.69	0.669
14.8	58	72.8	3.92	267.8	257	89	6.14	0.614	125	8.62	0.862
53.3	132.6	185.9	2.49	310.7	292	95	6.55	0.655	95	6.55	0.655
37.9	72.7	110.6	1.92	338.3	312	96	6.62	0.662	240	16.55	1.655
15	69.5	84.5	4.63	264.1	254	118	8.14	0.814	115	7.93	0.793
22.5	60	82.5	2.67	302.8	285	92	6.34	0.634	96	6.62	0.662
43.8	73.1	116.9	1.67	355.2	324	100	6.89	0.689	106	7.31	0.731
91.9	170.3	262.2	1.85	346.6	318	112	7.72	0.772	132	9.10	0.910
64.9	22.2	87.1	0.34	538.7	374.5	97	6.69	0.669	105	7.24	0.724
65.5	139.2	204.7	2.13	330.1	307	106	7.31	0.731	110	7.58	0.758
77.1	115.6	192.7	1.50	372.2	335	117	8.07	0.807	455	31.37	3.137
9.4	24.1	33.5	2.56	306.5	289	93	6.41	0.641	105	7.24	0.724
41	18.6	59.6	0.45	508	374.2	97	6.69	0.669	110	7.58	0.758
16.1	32.8	48.9	2.04	330.8	307	94	6.48	0.648	115	7.93	0.793
43.5	156.8	200.3	3.60	276.2	264.25	94	6.48	0.648	184	12.69	1.269
38.7	136.8	175.5	3.53	279.7	267	100	6.89	0.689	100	6.89	0.689
47.4	116.9	164.3	2.47	312.7	293	99	6.83	0.683	105	7.24	0.724
23.6	61.1	84.7	2.59	306.9	289	96	6.62	0.662	100	6.89	0.689

APENDICE A
RELACIÓN AGUA – VAPOR EN CERRO PRIETO

DATOS OTORGADOS POR C.F.E. DE LOS POZOS DE CERRO PRIETO

VAPOR	AGUA	MEZCLA	Relación	ENTALPIA	TEMP.	PRESIÓN DEL SEPARADOR			PRESIÓN DEL POZO		
			Agua/Vapor	kCal/kg	°C	PSIG	bar	MPa	PSIG	bar	MPa
13.6	62.7	76.3	4.61	273.6	262	88	6.07	0.607	120	8.27	0.827
54.2	135.86	190.06	2.51	310.7	292	98	6.76	0.676	99	6.83	0.683
36.9	75.6	112.5	2.05	330.7	307	95	6.55	0.655	240	16.55	1.655
15.34	57.8	73.14	3.77	279.18	267	116	8.00	0.800	117	8.07	0.807
20.9	69.8	90.7	3.34	282.6	269.58	95	6.55	0.655	100	6.89	0.689
40.1	115.9	156	2.89	294.5	279	90	6.21	0.621	485	33.44	3.344
40.4	135	175.4	3.34	284.6	271	100.5	6.93	0.693	248	17.10	1.710
45.3	115	160.3	2.54	309.44	291	98	6.76	0.676	111	7.65	0.765
64.7	58.6	123.3	0.91	429.2	363.3	103	7.10	0.710	%	0.00	0.000
45.8	100.7	146.5	2.20	324.83	302.6	100	6.89	0.689	285	19.65	1.965
9.7	24.1	33.8	2.48	310.5	292	94	6.48	0.648	100	6.89	0.689
51.15	116.9	168.05	2.29	320.43	299	99	6.83	0.683	120	8.27	0.827
54.7	41.9	96.6	0.77	452.2	370	117	8.07	0.807	%	0.00	0.000
102.7	92	194.7	0.90	433.6	364.83	117	8.07	0.807	960	66.19	6.619
70.3	160.95	231.25	2.29	323.9	302	112	7.72	0.772	128	8.83	0.883
37.5	105.24	142.74	2.81	304.2	287	114	7.86	0.786	118	8.14	0.814
15.7	37	52.7	2.36	319.4	299	106	7.31	0.731	106	7.31	0.731
50.17	75.4	125.57	1.50	371.3	334.26	116	8.00	0.800	133	9.17	0.917
30.97	52.39	83.36	1.69	355.2	324	106	7.31	0.731	110	7.58	0.758
87.32	168.2	255.52	1.93	342	315	114	7.86	0.786	128	8.83	0.883
64.4	21.58	85.98	0.34	538.7	374.5	102	7.03	0.703	109	7.52	0.752
65.6	139.1	204.7	2.12	330.2	307	106	7.31	0.731	112	7.72	0.772
69.43	105.7	175.13	1.52	370.25	334	118	8.14	0.814	425	29.30	2.930
26	15.5	41.5	0.60	478.25	373.5	100	6.89	0.689	105	7.24	0.724
38.4	25.5	63.9	0.66	466.6	372.5	102	7.03	0.703	115	7.93	0.793
43.48	85.30		2.23	343.09	308.2	102.11	7.04	0.70	180	11.60	1.16

VALORES PROMEDIO

Calidad en función de la cantidad de vapor de la mezcla

	Ton./h
Masa de vapor	1.00
Masa de salmuera	2.23
Masa de la mezcla	3.23
CALIDAD=masa vapor/masa de la mezcla	30.96%

Calidad en función de la entalpia de la mezcla

Entalpia en kJ/kg	1436.4	kJ/kg	
Propiedades a 10.5 bar	hf	772.23	hg 2780.0
	hfg	2007.7	
CALIDAD	33.08	%	

A partir de estos datos se realizó el cálculo de la calidad de la mezcla, obteniendo un valor por dos modos de cálculo. El primer cálculo se realizó a partir de la relación agua (salmuera) – vapor, de tal modo que se conoce la cantidad de vapor que está contenido en la mezcla. Por tanto sabiendo que por unidad de masa de vapor se obtienen 2.23 unidades de salmuera, y recordando la definición de calidad de vapor, se tiene:

$$x = \frac{\text{masa de vapor}}{\text{masa de la mezcla}} \times 100 \qquad x = \frac{1}{3.23} \times 100 = 30.96\%$$

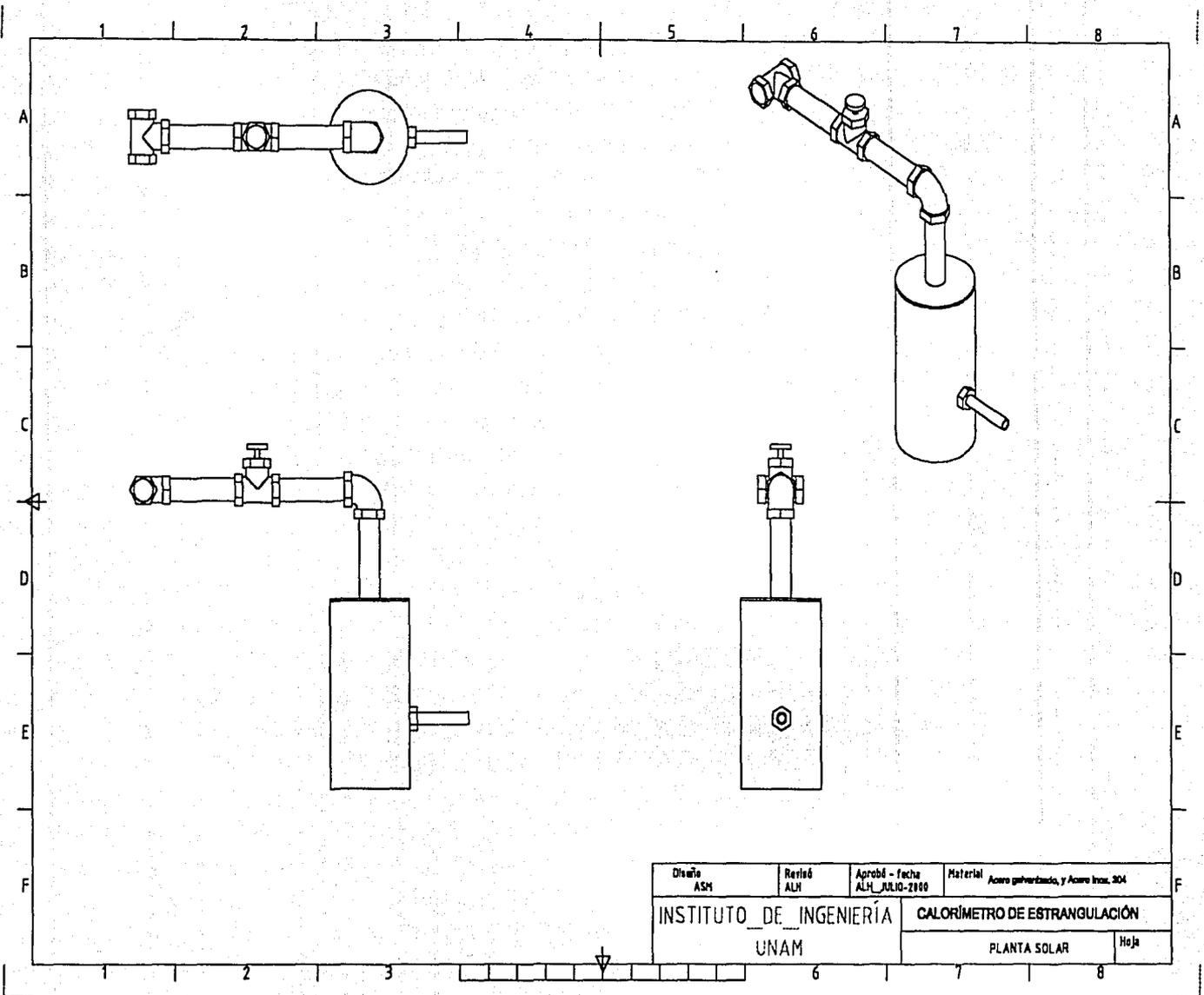
Por lo tanto la calidad para este caso es de 30.96%

La segunda forma en que se calculó la calidad del vapor es tomando en cuenta la entalpía de la mezcla, y con la presión de salida del separador se conoce las entalpías de líquido saturado y de vapor saturado. El valor de la calidad se obtiene entonces por cálculo directo de la ecuación de calidad.

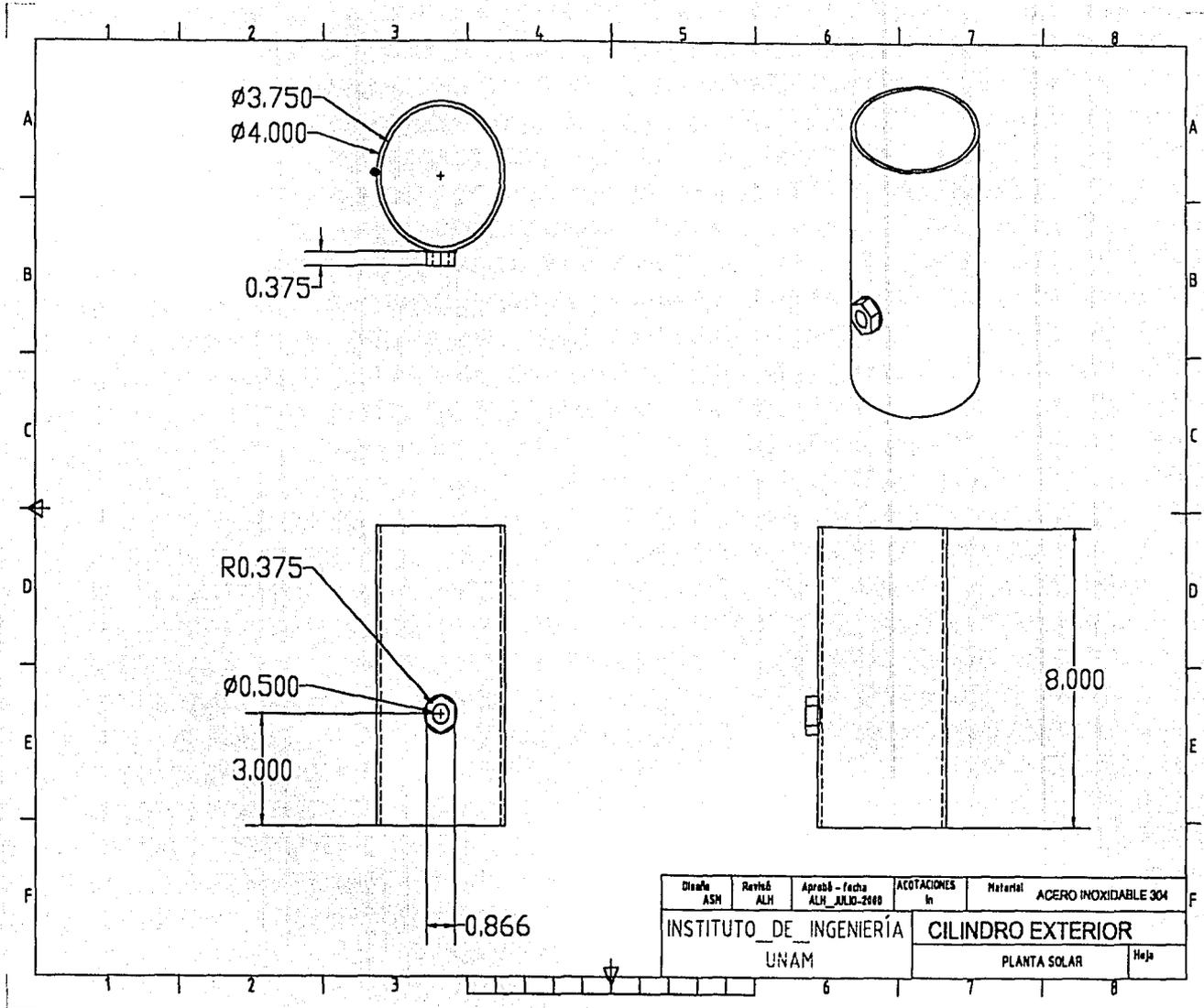
$$x = \frac{h - h_f}{h_{fg}} \times 100 \qquad x = \frac{1436.4 - 772.23}{2007.7} \times 100 = 33.08\%$$

APENDICE B

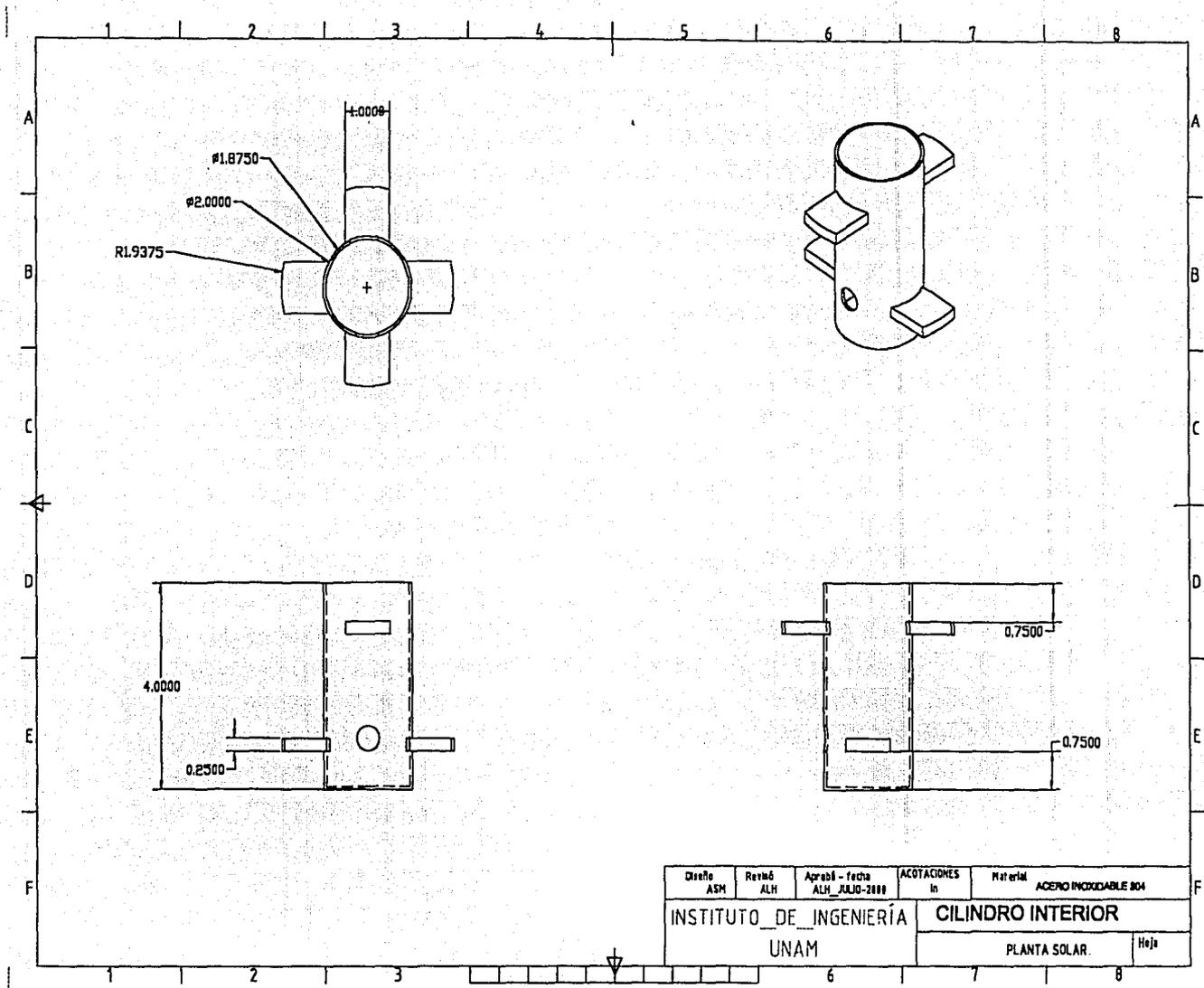
PLANOS DEL CALORÍMETRO



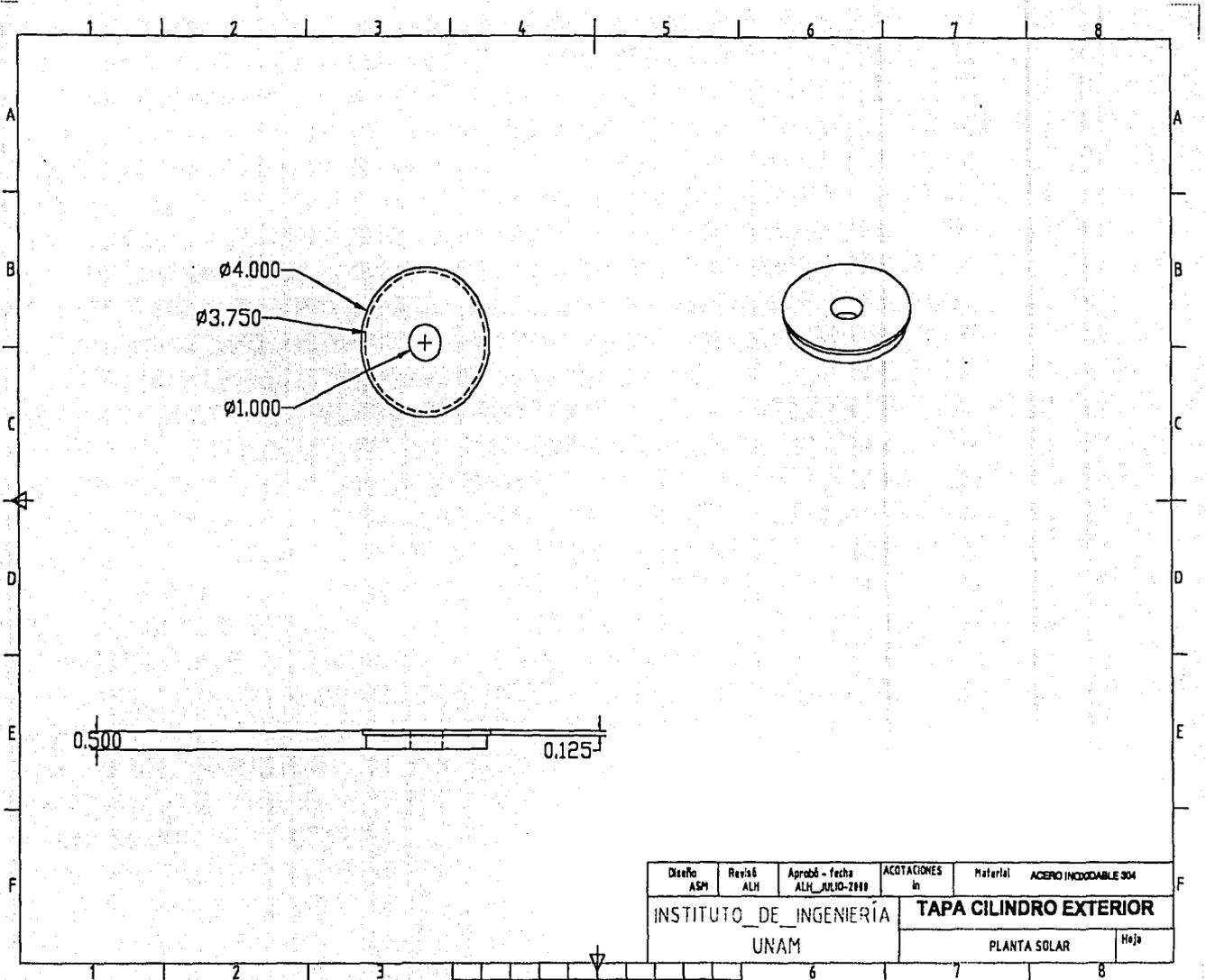
Diseño ASM	Revisó ALH	Aprobó - fecha ALH JULIO-2000	Materiales Acero galvanizado, y Acero Inox. 304
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM			CALORÍMETRO DE ESTRANGULACIÓN
			PLANTA SOLAR
			Hoja

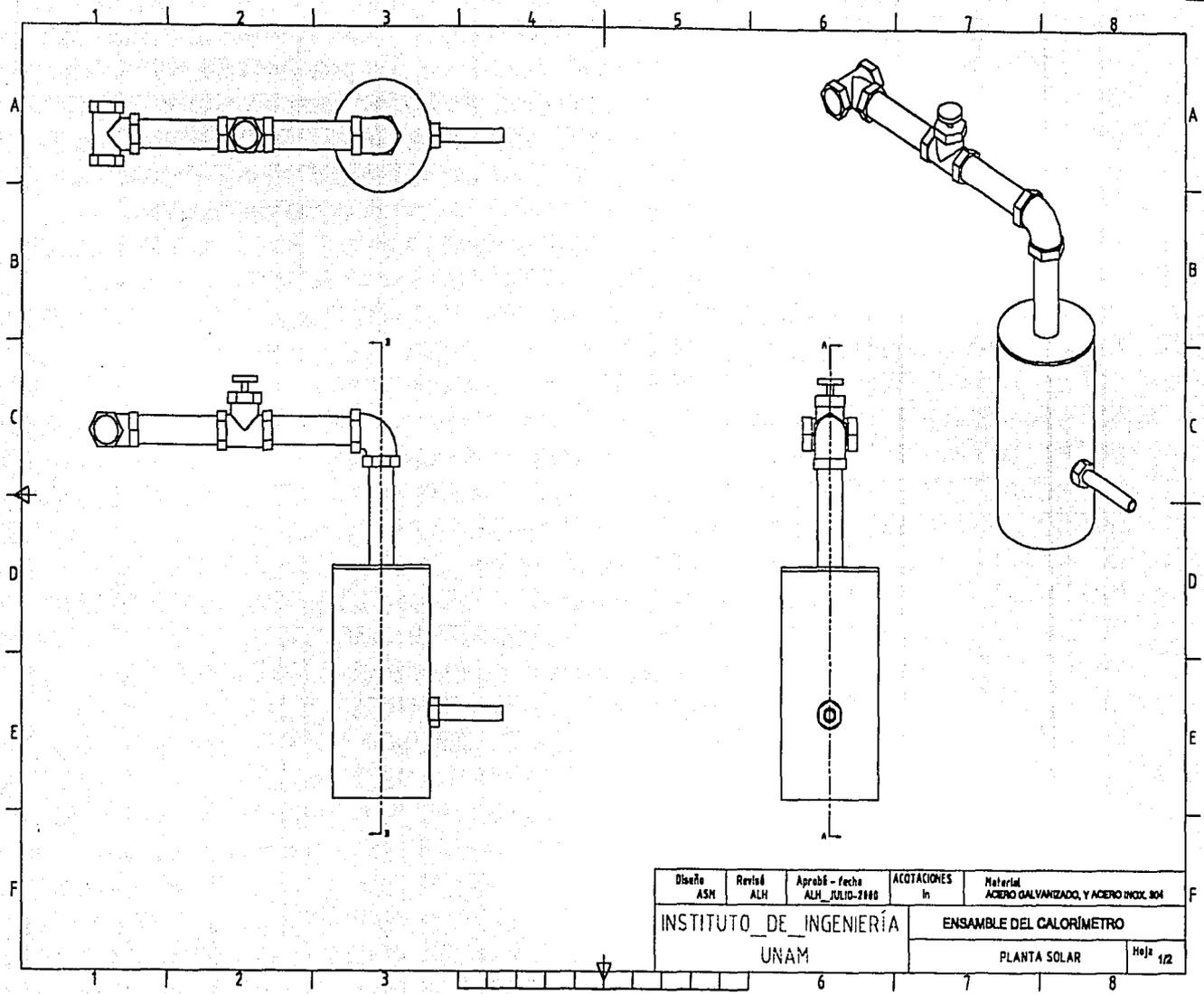


Diseño ASM	Revisó ALH	Aprobó - fecha ALH JULIO-2000	ACOTACIONES In	Material ACERO INOXIDABLE 304
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM			CILINDRO EXTERIOR	
PLANTA SOLAR				Hoja

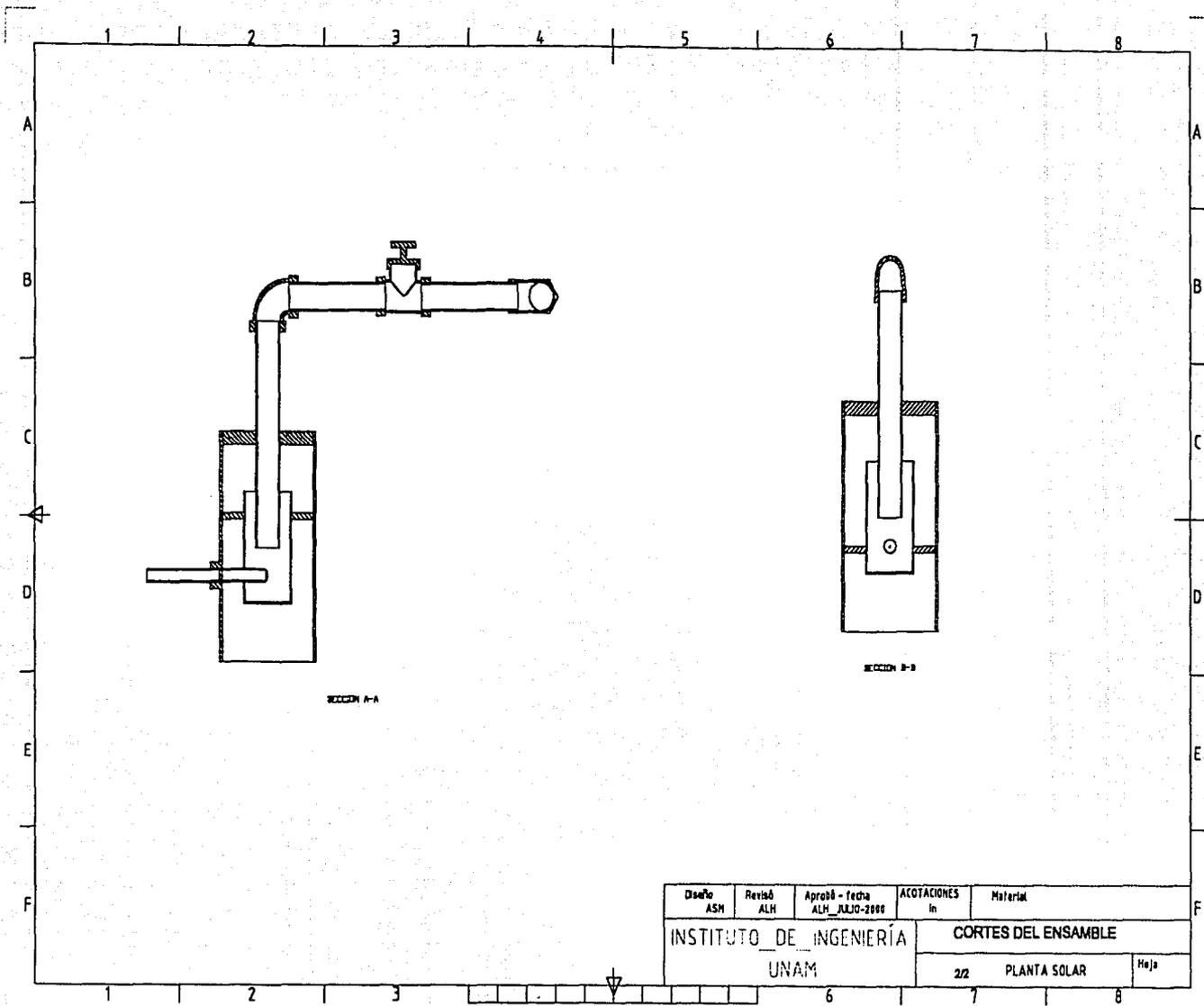


Diseño ASH	Revisó ALH	Aprobó - fecha ALH JULIO-2000	ACOTACIONES In	Material ACERO INOXIDABLE 304
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM			CILINDRO INTERIOR	
PLANTA SOLAR.				Hoja





Diseño ASH	Revisó ALH	Aprobó - fecha ALH JULIO-2000	ACOTACIONES In	Materiales ACERO GALVANIZADO, Y ACERO INOX. 304
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM			ENSAMBLE DEL CALORÍMETRO	
PLANTA SOLAR				Hoja 1/2



Diseño ASH	Revisó ALH	Aprobó - fecha ALH JULIO-2000	ACOTACIONES In	Material
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM			CORTES DEL ENSAMBLE	
			2/2	PLANTA SOLAR
				Hoja

APENDICE C

RESULTADOS DE PRUEBAS DE LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL VAPOR

A continuación se presentan las tablas que contienen los datos obtenidos durante las pruebas realizadas para la obtención de la calidad del vapor obtenido a partir de agua, posteriormente se muestran las gráficas correspondientes a dichas tablas.

Mediciones de prueba realizadas con vapor de agua generado por concentradores de cilíndrico-parabólicos en Planta solar.

Tabla 1

p1 man kg/cm2	Presión de Vapor p1 (Mpa)	Tsat. a p1 °C	hf de p1 kJ/kg	hfg de p1 kJ/kg	Temp. calorímetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
8.0	0.8587	173.40	734.09	2037.92	119	2716.916	97.3
7.0	0.7632	168.49	712.6	2054.62	112	2703.028	96.9
7.0	0.7632	168.49	712.6	2054.62	99.4	2677.96	95.7
9.0	0.9565	177.98	754.31	2022.06	110	2677.96	95.1
8.0	0.8587	173.40	734.09	2037.92	96	2671.16	95.1
14.0	1.4455	196.57	837.03	1954.01	109	2697.07	95.2
8.0	0.8587	173.40	734.09	2037.92	95.8	2670.76	95.0
8.0	0.8587	173.40	734.09	2037.92	100.9	2680.95	95.5
11.8	1.2353	189.31	804.51	1981.33	96	2671.16	94.2
10.0	1.0543	182.22	773.03	2007.06	88.4	2657.54	93.9
9.0	0.9565	177.98	754.31	2022.06	94.4	2667.96	94.6
8.0	0.8587	173.40	734.09	2037.92	93	2665.14	94.8
4.0	0.4675	149.34	629.35	2116.33	90.1	2659.32	95.9
9.0	0.9565	177.98	754.31	2022.06	88.4	2657.54	94.1

En este caso la temperatura del vapor fue la que se uso como parámetro para leer las entalpías

Tabla 2

p1 man kg/cm2	Temp. de vapor T1 (°C)	Presión a T1 Mpa	hf de T1 kJ/kg	hfg de T1 kJ/kg	Temp. calorímetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
7.3	170	0.7917	719.21	2049.5	119	2716.916	97.5
6.2	164	0.6833	692.98	2069.5	112	2703.028	97.1
5.5	160	0.6178	675.55	2082.6	99.4	2677.96	96.1
7.3	170	0.7917	719.21	2049.5	110	2677.96	95.6
5.5	160	0.6178	675.55	2082.6	96	2671.16	95.8
15.1	200	1.5538	852.45	1940.7	109	2697.07	95.0
9.0	170	0.9569	719.21	2049.5	95.8	2670.76	95.2
9.0	170	0.9569	719.21	2049.5	100.9	2680.95	95.7
10.4	184	1.0977	780.93	2000.7	96	2671.16	94.5
7.3	170	0.7917	719.21	2049.5	88.4	2657.54	94.6
7.3	170	0.7917	719.21	2049.5	94.4	2667.96	95.1
6.6	166	0.718	701.71	2062.9	93	2665.14	95.2
9.3	120	0.9853	503.71	2202.6	90.1	2659.32	97.9
7.3	170	0.7917	719.21	2049.5	88.4	2657.54	94.6

Tabla 3

p1 man kg/cm2	Presión de Vapor p1 (Mpa)	Tsat. a p1 °C	hf de T1 kJ/kg	hfg de T1 kJ/kg	Temp. calorímetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
6.0	0.6642	162.86	688.03	2073.202	109	2697.07	96.9
5.5	0.6153	159.84	674.84	2083.09	19.6	2698.26	97.1
5.0	0.5663	159.99	660.81	2093.48	111	2701.04	97.5
4.8	0.5419	154.91	653.45	2098.86	110.9	2700.85	97.5
4.5	0.5174	153.14	645.83	2104.39	109.7	2698.46	97.5
4.3	0.4930	151.33	637.93	2110.11	109.4	2697.87	97.6

APENDICE C
RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

Tabla 4

p1 man kg/cm2	Presión de Vapor p1 (Mpa)	Tsat. a p1 °C	hf de T1 kJ/kg	hfg de T1 kJ/kg	Temp. calorimetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
12.0	1.251	189.88	807.07	1979.715	94.1	2667.35	94.0
11.0	1.154	186.23	790.82	1992.64	95	2669.16	94.3
10.0	1.056	182.29	773.34	2006.8	94	2667.15	94.4
9.0	0.9578	178.04	754.57	2021.85	94.5	2668.16	94.6
6.6	0.7229	166.27	702.91	2061.98	91.5	2662.13	95.0
6.0	0.6642	162.86	688.03	2073.2	92.2	2663.54	95.3
3.8	0.4489	147.84	622.86	2120.98	100.1	2699.26	97.9
1.0	0.1749	116.05	239.37	2365.33	102.7	2684.53	103.4

Tabla 5

p1 man kg/cm2	Presión de Vapor p1 (Mpa)	Tsat. a p1 °C	hf de T1 kJ/kg	hfg de T1 kJ/kg	Temp. calorimetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
6.0	0.6642	162.86	688.03	2073.2	90.1	2659.32	95.1
5.0	0.5663	159.99	660.81	2093.48	90	2659.12	95.5
4.4	0.5076	152.42	642.68	2106.68	90.6	2660.33	95.8
2.8	0.351	138.98	584.76	2147.8	99	2677.16	97.4
1.4	0.214	122.51	513.84	2195.92	97.4	2673.96	98.4

Tabla 6

p1 man kg/cm2	Presión de Vapor p1 (Mpa)	Tsat. a p1 °C	hf de T1 kJ/kg	hfg de T1 kJ/kg	Temp. calorimetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
14.0	1.447	196.62	837.25	1953.83	88.5	2664.34	93.5
9.0	0.9578	178.04	754.57	2021.85	92.6	2664.34	94.5
8.0	0.8599	173.44	734.36	2037.18	90.6	2660.33	94.5
7.0	0.7621	168.43	712.34	2054.82	91.3	2661.73	94.9
6.0	0.6642	162.86	688.03	2073.2	95.5	2670.16	95.6
5.0	0.5663	159.99	660.8	2093.48	92.7	2664.54	95.7

Tabla 7

p1 man kg/cm2	Presión de Vapor p1 (Mpa)	Tsat. a p1 °C	hf de T1 kJ/kg	hfg de T1 kJ/kg	Temp. calorimetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
13.0	1.349	193.35	822.56	1966.23	91	2661.128	93.5
11.8	1.232	189.18	803.96	1981.78	103	2685.13	94.9
10.8	1.1339	185.44	787.33	1995.48	103.7	2686.52	95.2
10.0	1.0556	182.29	773.27	2006.86	104.3	2687.72	95.4
9.0	0.9578	178.04	754.57	2021.85	105.6	2690.3	95.7
8.0	0.8599	173.44	734.36	2037.18	106.5	2692.095	96.1
8.0	0.8599	173.44	734.36	2037.18	107.4	2693.87	96.2
6.5	0.7131	165.72	700.49	2063.81	108.1	2695.28	96.7
5.0	0.5663	159.99	660.8	2073.202	108.2	2695.48	98.1
4.5	0.5174	153.14	645.97	2104.19	107.6	2694.28	97.3
3.0	0.3706	140.84	593.17	2141.82	110	2699.06	98.3
2.0	0.2728	130.33	547.86	2173.02	110.4	2699.85	99.0

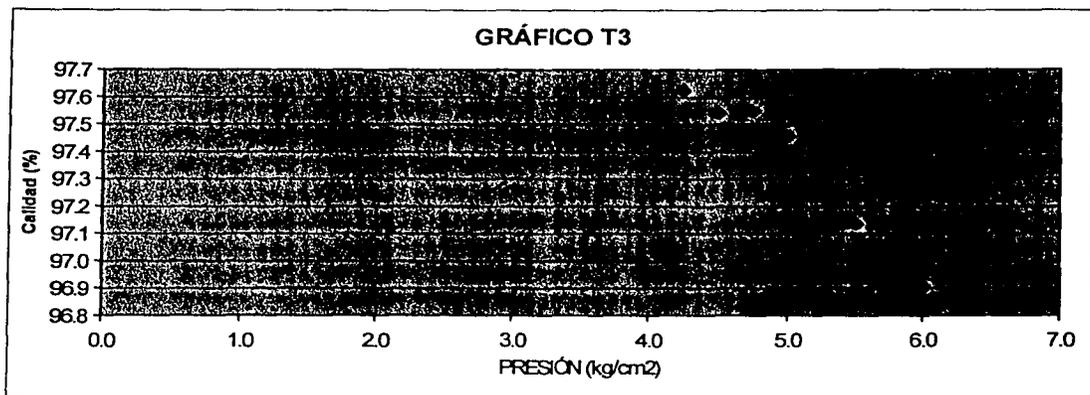
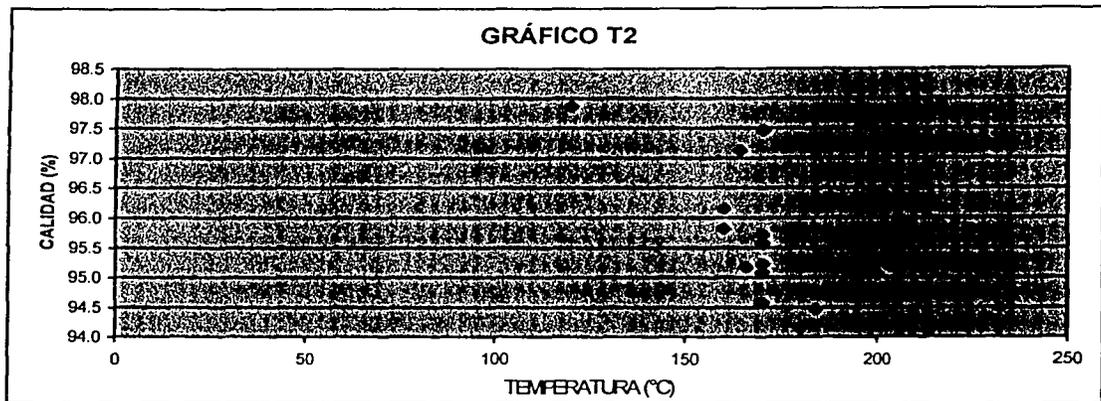
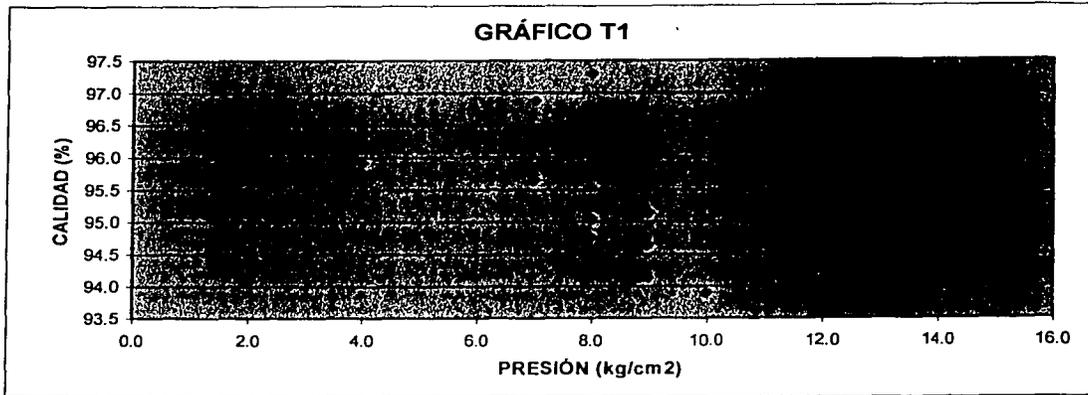


GRÁFICO T4

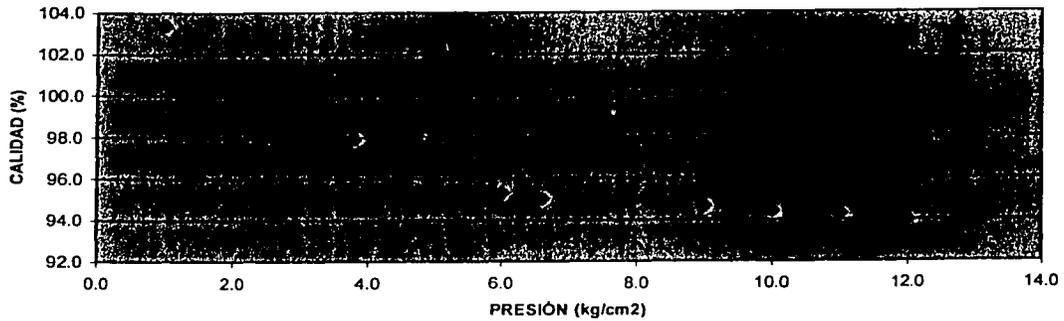


GRÁFICO T5

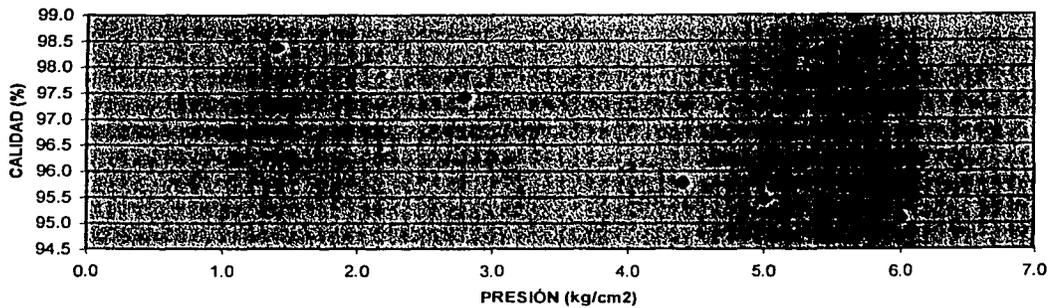
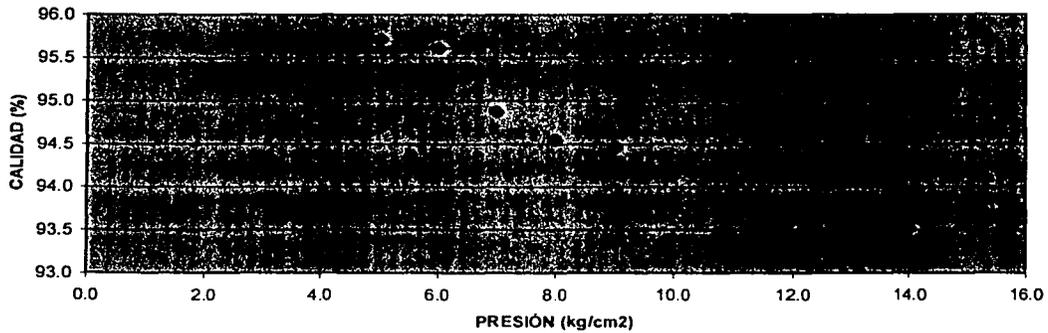
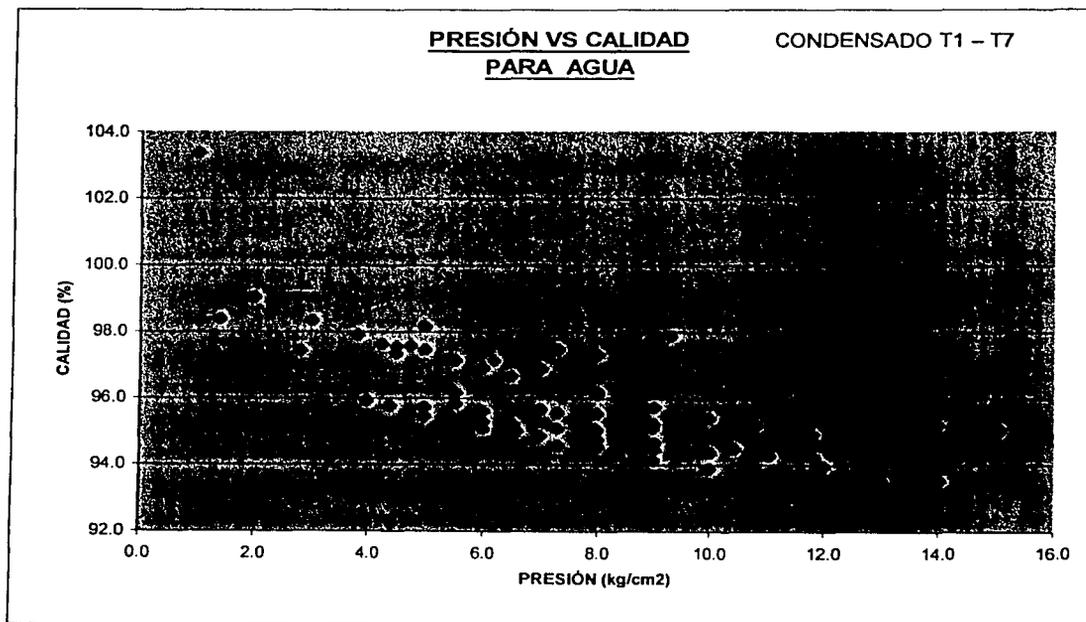
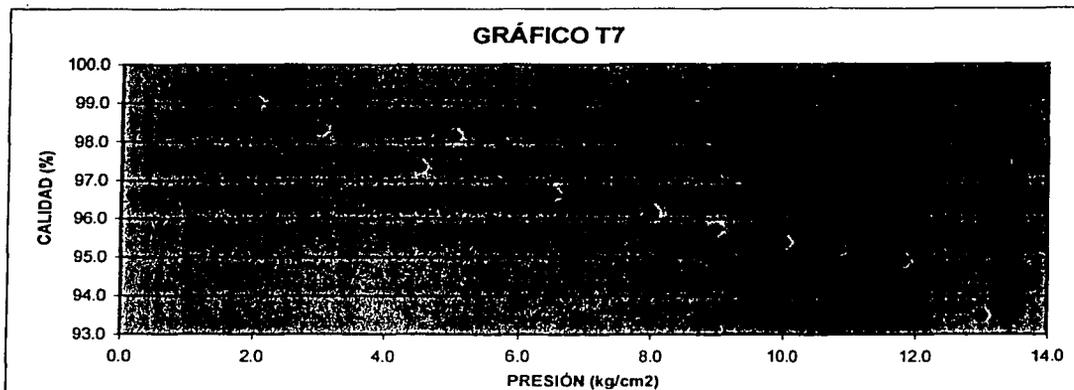


GRÁFICO T6





Las siguientes tablas muestran los resultados de las pruebas realizadas para la medición de la calidad del vapor obtenido a partir de salmuera, tratando de simular la salmuera que se obtiene en las plantas de Geotermia de Cerro Prieto, en Mexicali Baja California Norte, México. Posteriormente se muestran los gráficos correspondientes a dichas tablas.

Mediciones de pruebas realizadas con vapor generado por concentradores de cilíndrico-parabólicos, a partir de salmuera en Planta solar.

Tabla 1-S

p1 man kg/cm2	Presión de Vapor p1 (Mpa)	Tsat. a p1 °C	hf de p1 kJ/kg	hfg de p1 kJ/kg	Temp. calorímetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
11	1.153	186.19	790.649	1992.78	95.3	2669.76	94.30
10.4	1.094	183.85	780.26	2001.27	96	2671.16	94.49
10	1.055	182.25	773.155	2006.95	93.7	2666.55	94.34
10.2	1.075	183.08	776.825	2004.025	92.8	2664.74	94.21
9.8	1.035	181.41	769.44	2009.95	93.1	2665.34	94.33
9.2	0.977	178.90	758.35	2018.85	101.7	2682.54	95.31
8	0.859	173.46	734.38	2037.7	111.2	2701.44	96.53
7.2	0.781	169.39	716.52	2051.6	113.9	2706.80	97.01
5	0.566	156.58	660.71	2093.54	113.5	2706.00	97.70
5	0.566	156.58	660.71	2093.54	94.7	2668.56	95.91

Tabla 2-S

p1 man kg/cm2	Presión de Vapor p1 (Mpa)	Tsat. a p1 °C	hf de T1 kJ/kg	hfg de T1 kJ/kg	Temp. calorímetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
12	1.251	189.88	807.068	1979.22	97.2	2673.56	94.30
11	1.153	186.19	790.649	1992.78	105	2689.11	95.27
10	1.055	182.25	773.155	2006.95	108.3	2695.68	95.79
9	0.957	178.01	754.413	2021.98	104.6	2688.31	95.64
8	0.859	173.46	734.38	2037.7	102.2	2683.54	95.65
6	0.664	162.85	687.98	2073.24	94.5	2668.16	95.51
5.6	0.625	160.46	677.52	2081.1	94	2667.15	95.60
5	0.566	156.58	660.71	2093.54	94.6	2668.36	95.90
4	0.468	149.38	629.52	2116.2	98	2675.16	96.67
3.8	0.449	147.93	623.25	2120.7	102.6	2684.33	97.19
3	0.370	140.84	592.75	2142.2	106.2	2691.50	97.97
2	0.273	130.36	547.84	2173.12	105	2689.11	98.53

Tabla 3-S

p1 man kg/cm2	Presión de Vapor p1 (Mpa)	Tsat. a p1 °C	hf de T1 kJ/kg	hfg de T1 kJ/kg	Temp. calorímetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
5	0.566	156.58	660.71	2093.54	90.4	2659.92	95.49
4	0.468	149.38	629.52	2116.2	93	2665.14	96.19
3	0.370	140.84	592.75	2142.2	97.4	2673.96	97.15
2.8	0.351	138.98	584.76	2147.8	98.5	2676.16	97.37
3	0.370	140.84	592.75	2142.2	101.8	2682.74	97.56
2.6	0.331	136.85	575.61	2154.14	103.2	2685.53	97.95
2	0.273	130.36	547.84	2173.12	104.7	2688.51	98.51
1.8	0.253	127.83	537.04	2180.42	105.4	2689.91	98.74

APENDICE C
RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

Tabla 4-S

p1 man kg/cm2	Presión de Vapor p1 (Mpa)	Tsat. a p1 °C	hf de T1 kJ/kg	hfg de T1 kJ/kg	Temp. calorimetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
5.4	0.605	159.18	671.97	2085.25	86.4		
5.2	0.586	157.93	666.56	2089.24	87		
5	0.566	156.58	660.71	2093.54	90.4	2659.92	95.49
5.2	0.586	157.93	666.56	2089.24	90.6	2660.32	95.43
5.4	0.605	159.18	671.97	2085.25	91	2661.13	95.39
5.6	0.625	160.46	677.52	2081.1	91.2	2661.53	95.33
6	0.664	162.85	687.98	2073.24	91.5	2662.13	95.22
6.6	0.722	166.22	702.69	2062.14	91.8	2662.73	95.05
6.6	0.722	166.22	702.69	2062.14	92.2	2663.54	95.09
6.4	0.703	165.14	697.97	2065.73	92.5	2664.14	95.18
6.4	0.703	165.14	697.97	2065.73	93	2665.14	95.23
6.2	0.683	163.98	692.898	2069.53	94	2667.15	95.40
6	0.664	162.85	687.98	2073.24	108	2695.08	96.81
5.4	0.605	159.18	671.97	2085.25	107.4	2693.89	96.96
5.2	0.586	157.93	666.56	2089.24	108	2695.08	97.09
5	0.566	156.58	660.71	2093.54	108.6	2696.27	97.23
4.4	0.507	152.38	642.49	2106.82	101.8	2682.74	96.84
4.2	0.488	150.94	636.27	2111.28	100.3	2679.76	96.79
4	0.468	149.38	629.52	2116.2	100.3	2679.76	96.88
3.6	0.429	146.17	615.69	2126.06	101.4	2681.95	97.19

Tabla 5-S

p1 man kg/cm2	Presión de Vapor p1 (Mpa)	Tsat. a p1 °C	hf de T1 kJ/kg	hfg de T1 kJ/kg	Temp. calorimetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
12	1.251	189.88	807.068	1979.22	96	2671.16	94.2
11	1.153	186.19	790.649	1992.78	103	2685.13	95.1
10	1.055	182.25	773.155	2006.95	107.5	2694.09	95.7
9	0.957	178.01	754.413	2021.98	111.6	2702.23	96.3
8	0.859	173.46	734.38	2037.7	113.4	2705.81	96.7
7	0.762	168.43	712.32	2054.84	113.9	2706.80	97.1
6	0.664	162.85	687.98	2073.24	113.1	2705.21	97.3
5.4	0.605	159.18	671.97	2085.25	109.1	2697.27	97.1
4.8	0.546	155.20	654.71	2097.92	110.3	2699.66	97.5
4.7	0.537	154.56	651.94	2099.96	111	2701.04	97.6
4	0.468	149.38	629.52	2116.2	112.8	2704.62	98.1

Tabla 6-S

p1 man kg/cm2	Presión de Vapor p1 (Mpa)	Tsat. a p1 °C	hf de T1 kJ/kg	hfg de T1 kJ/kg	Temp. calorimetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
3	0.390	142.72	600.83	2136.6	90	2659.12	96.3
3	0.370	140.84	592.75	2142.2	93.3	2665.75	96.8
2.8	0.351	138.98	584.76	2147.8	95.8	2670.76	97.1
2.6	0.331	136.85	575.61	2154.14	96.6	2672.36	97.3
2.2	0.292	132.62	557.53	2166.52	98.8	2675.56	97.8
2	0.273	130.36	547.84	2173.12	100	2679.16	98.1

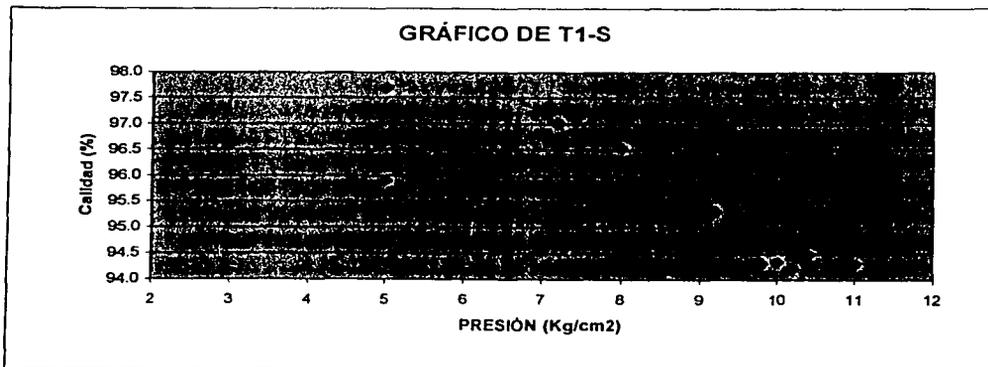
APENDICE C
RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

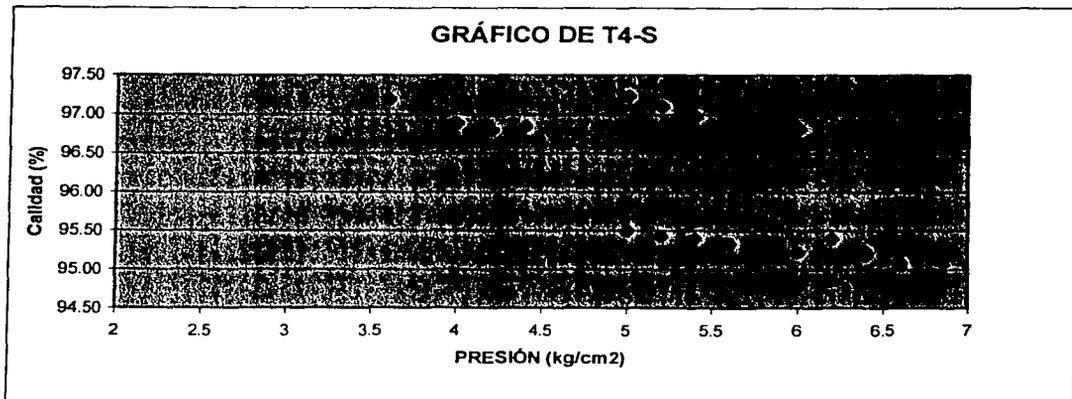
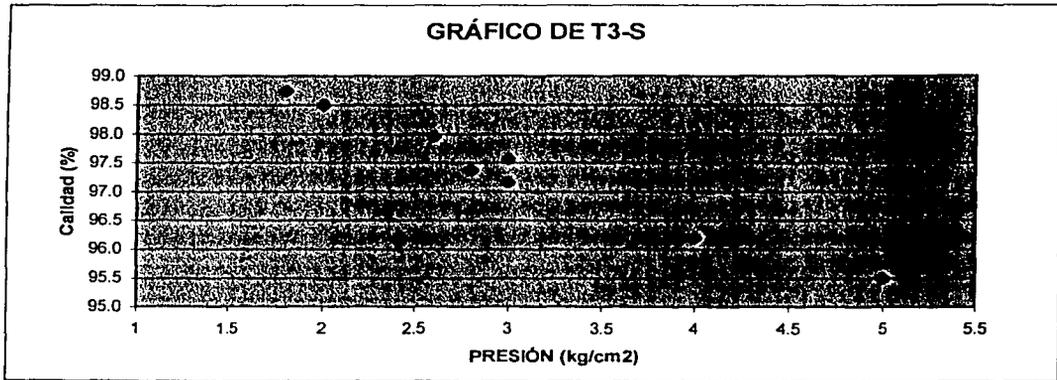
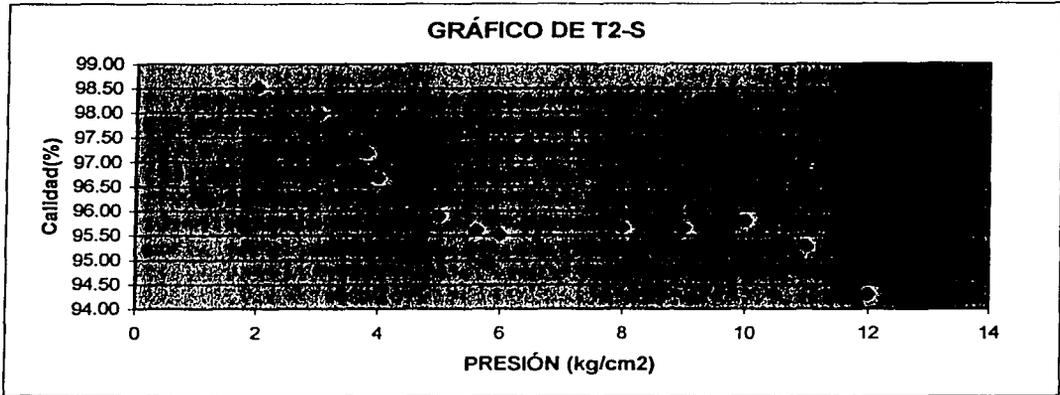
Tabla 7-S

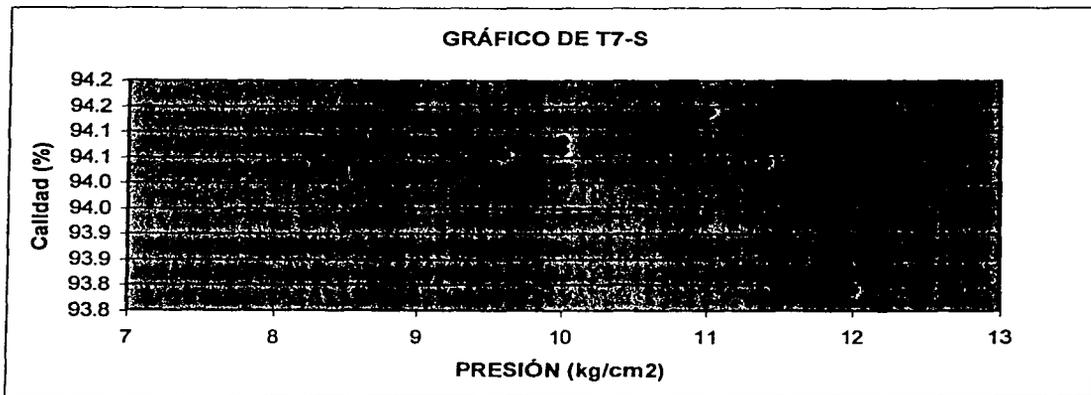
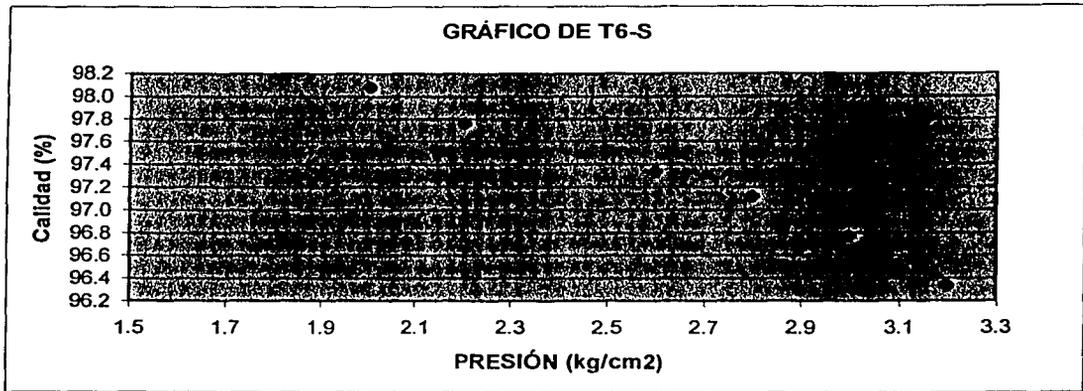
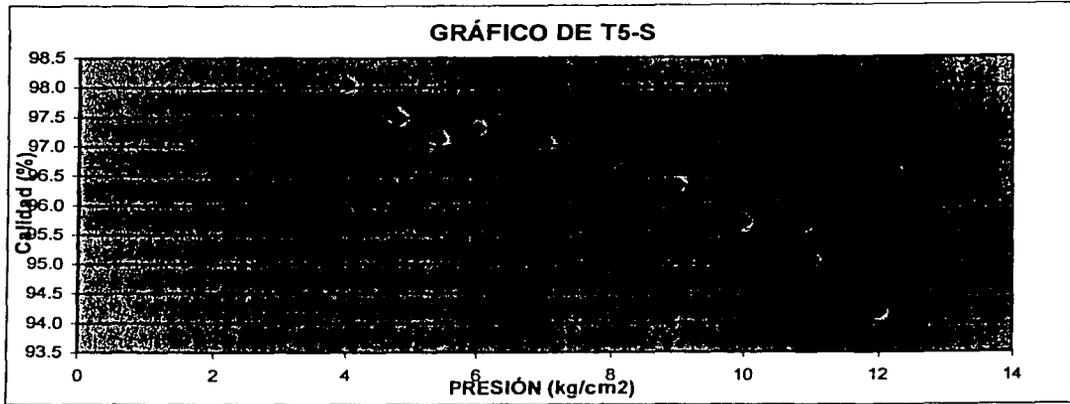
p1 man kg/cm2	Presión de Vapor p1 (Mpa)	Tsat. a p1 °C	hf de T1 kJ/kg	hfg de T1 kJ/kg	Temp. calorimetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
12	1.251	189.88	807.068	1979.22	87		
11.4	1.192	187.69	797.3	1987.32	89.7		
11	1.153	186.19	790.649	1992.78	90.3	2659.72	93.8
10	1.055	182.25	773.155	2006.95	90.7	2660.53	94.0
9.6	1.016	180.59	765.87	2012.82	90.8	2660.73	94.1
10	1.055	182.25	773.155	2006.95	91.1	2661.33	94.1
10.2	1.075	183.08	776.825	2004.025	91.3	2661.73	94.1
10.4	1.094	183.85	780.26	2001.27	91.8	2662.73	94.1

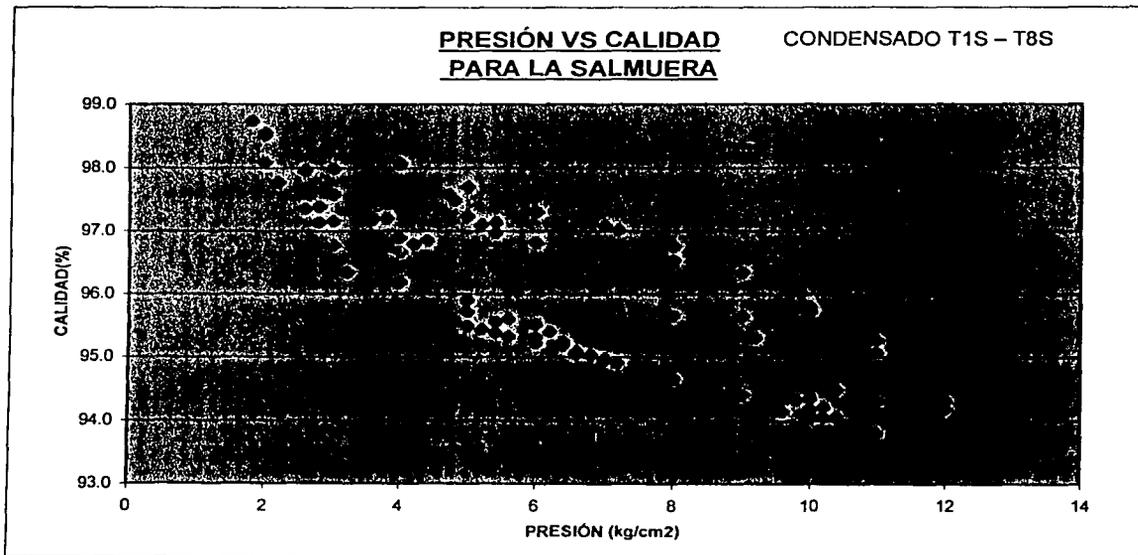
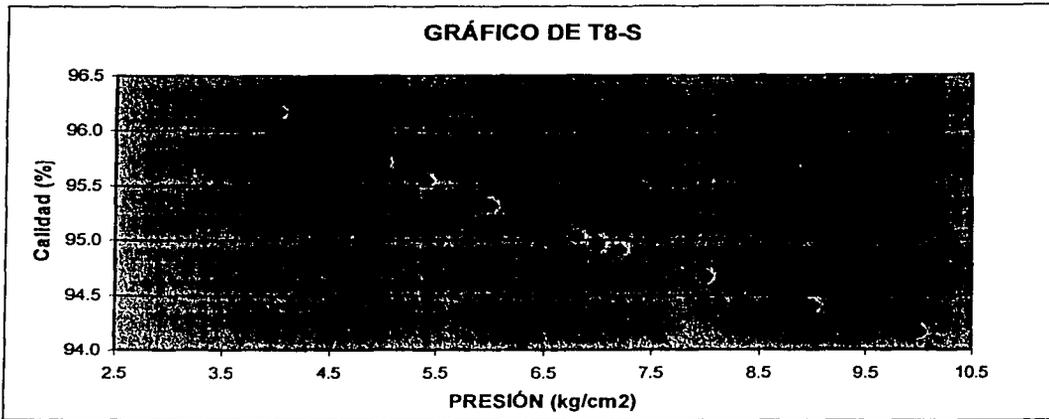
Tabla 8-S

p1 man kg/cm2	Presión de Vapor p1 (Mpa)	Tsat. a p1 °C	hf de T1 kJ/kg	hfg de T1 kJ/kg	Temp. calorimetro Tc (°C)	h con patm y Tc kJ/kg	x %
10	1.055	182.25	773.155	2006.95	92	2663.136	94.2
9	0.957	178.01	754.413	2021.98	92	2663.136	94.4
8	0.859	173.46	734.38	2037.7	92.1	2663.3368	94.7
7	0.762	168.43	712.32	2054.84	92.1	2663.3368	94.9
6.8	0.742	167.34	707.55	2058.44	92.3	2663.7384	95.0
7	0.762	168.43	712.32	2054.84	92.3	2663.7384	95.0
7.2	0.781	169.39	716.52	2051.6	92.3	2663.7384	94.9
7	0.762	168.43	712.32	2054.84	92.4	2663.9392	95.0
6	0.664	162.85	687.98	2073.24	92.5	2664.14	95.3
5.4	0.605	159.18	671.97	2085.25	92.6	2664.3408	95.5
5	0.566	156.58	660.71	2093.54	92.7	2664.5416	95.7
4	0.468	149.38	629.52	2116.2	92.8	2664.7424	96.2









REFERENCIAS:

- Almanza R., Muños F., "Ingeniería de la energía solar"; El colegio nacional; México 1994.
- CFE; www.CFE.gob.mx; 2000
- Elias A. Alfredo; "Informe Anual del Director de CFE"; 2000.
- Faires V., Clifford S., Alexander S.; "Termodinámica"; UTHEA, México 1973.
- Gilbert E. Cohen, David W. Kearney, Gregory J. Kolb; "Final Report on the operation and maintenance improvement program for concentrating solar power plants", Junio 1999.
- H. Christopher, H. Armstead ; "Geothermal energy", London New York, 1983.
- Hans Rau; "Energía Solar aplicaciones prácticas"; Marcombo Boixareu Editores; Barcelona-México 1984.
- John Elder; "Geothermal systems"; Academic press, The University of Manchester, 1981.
- Pascal De Laquil III, David Kearney, Michael Geyer, Richard Diver; "Renewables Energy"; 1999.
- Plataforma Solar de Almería; www.imas.d-tecnologia.com.
- Romero Alvarez Manuel; "Las energías renovables y su impacto"; www.iie.org.mx; 2000.
- Secretaria de Energía; "Prospectiva del sector eléctrico 2000-2009"; México 2000.
- Severns W.H., Degler H.E., Miles J.C.; "Energía mediante vapor aire o gas"; Editorial Reverté; México 1974.
- Solar One, Sandia National Laboratories; "Primeros pasos en la búsqueda"; www.ca.sandia.gov/news/solar.html