



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS  
DE CONDUCCION DE FLUIDO GEOTERMICO  
EN LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A N

GUSTAVO ALVAREZ SANCHEZ  
LUIS ANTONIO TALAVERA RAMIREZ  
DIR. ING. EDUARDO HERNANDEZ GORIBAR

MEXICO, D. F.

1984



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

# INDICE

PAGINA

INTRODUCCION.

CAPITULO 1.

GENERALIDADES EN TORNO A LA GEOTERMIA.

1.1 Desarrollo Geotérmico Mundial .....	1
1.2 Desarrollo Geotérmico en México .....	8
1.3 La Energía Geotérmica .....	13
1.3.1 Aspectos Generales .....	13
1.3.2 Descripción de los Ciclos Térmicos .....	18

CAPITULO 2

CICLO CON DOS ETAPAS DE SEPARACION.

2.1 Características Termodinámicas .....	30
2.2 Equipos Principales .....	44

CAPITULO 3

CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO.

3.1 Generalidades .....	64
3.2 Geología y Origen del Vapor .....	69
3.3 Características de los Pozos .....	73
3.4 Características del Fluido .....	82

## CAPITULO 4

### METODOS DE DIMENSIONAMIENTO DE TUBERIAS Y EQUIPOS.

4.1	Introducción .....	86
4.2	Dimensionamiento de las Líneas de Conducción .....	87
4.2.1	Dimensionamiento de Tuberías Conductoras de una Fase .....	87
4.2.2	Dimensionamiento de Tuberías Conductoras de Mezcla Bifásica .	89
4.2.3	Diseño Mecánico de la Tubería .....	101
4.2.4	Aislamiento Térmico .....	109
4.2.5	Contenido de Sólidos Totales en el Vapor .....	112
4.3	Dimensionamiento de los Equipos de Separación .....	117

## CAPITULO 5

### PLANTEAMIENTO Y ANALISIS DE ALTERNATIVAS DE CONDUCCION DE FLUIDO.

5.1	Introducción .....	129
5.2	Alternativa " A " .....	135
5.3	Alternativa " B " .....	151
5.4	Alternativa " C " .....	170
5.5	Alternativa " D " .....	185

## CAPITULO 6

CONCLUSIONES .....	199
--------------------	-----

### ANEXO A.

Programa Para el Dimensionamiento de Líneas Conductoras de Vapor Saturado .....	202
---	-----

### ANEXO B.

Programa Para el Dimensionamiento de Tuberías Conductoras de Flujo Bifásico .....	210
---	-----



ANEXO C.

Programa Para el Cálculo del Aislamiento Térmico Requerido y Sólidos  
Totales en el Vapor .....217

ANEXO D.

Programa Para el Dimensionamiento de Separadores Webre .....226

ANEXO E.

Programa Para el Calcular el Valor Presente de una Alternativa de  
Inversión .....237

BIBLIOGRAFIA .....245

## INTRODUCCION

La utilización del vapor producido por el calor de la tierra para generar energía eléctrica data de 1904 en Larderello, Italia y en nuestro país desde 1959 con la instalación de una pequeña planta generadora en Pathé estado de Hidalgo.

Actualmente en México, la generación de electricidad por este medio se lleva a cabo en dos campos geotérmicos, que son: Cerro Prieto en el estado de Baja California Norte y Los Azufres en el estado de Michoacán.

Debido a las características de estos campos geotérmicos el flujo de los pozos es una mezcla de agua y vapor, existiendo diferentes ciclos para aprovechar la energía contenida en el fluido para generar electricidad. Este trabajo está enfocado a la utilización directa del vapor geotérmico en un Ciclo Rankine convencional, requiriéndose por lo tanto, separar el vapor del fluido geotérmico y enviarlo a la turbina a través de lo que se conoce como sistema de separación y conducción.

El objetivo de este trabajo es establecer los métodos y recomendaciones necesarios para dimensionar y analizar las diferentes formas de conducir y acondicionar el vapor proveniente del pozo geotérmico antes de ser introducido en la turbina.

Este trabajo, después de plantear las metodologías de dimensionamiento, presenta cuatro ejemplos de sistemas de conducción y separación, tomando como base la información del campo geotérmico de Cerro Prieto II, realizándose un estudio económico a valor presente para determinar cual de ellas es la más económica.

El presente estudio se dividió de la siguiente forma para alcanzar los objetivos propuestos.

#### CAPITULO 1

Plantea aspectos generales de la utilización de la energía geotérmica a nivel mundial, en cuanto a tipo y capacidad de las plantas instaladas. Además incluye los diversos ciclos para generar electricidad a partir del fluido geotérmico.

#### CAPITULO 2

Es un estudio del ciclo con dos etapas de evaporación-separación tanto en sus características termodinámicas, como en las de sus equipos principales como son: equipos de separación, secadores, turbina, etc.

#### CAPITULO 3

Se describen las características del campo geotérmico de Cerro Prieto, así como los métodos de perforación y prueba de los pozos geotérmicos.

#### CAPITULO 4

Se plantean los métodos y recomendaciones necesarios para el dimensionamiento

to de un sistema de separación y conducción.

## CAPITULO 5

Se analizan cuatro alternativas de sistema de conducción, se presentan lista de materiales, equipo de separación requerido y el análisis económico a valor presente, para cada una de las alternativas.

Como Anexos se presentan programas para calculadora " Texas Instruments 59 " basados en los procedimientos presentados en el Capítulo 4. Cada programa contiene: manual de usuario, un ejemplo resuelto y el listado, para que pueda ser utilizado por cualquier persona interesada.

## GENERALIDADES EN TORNO A LA GEOTERMIA

### 1.1 DESARROLLO GEOTERMICO MUNDIAL.

La utilización de la Energía Geotérmica para el uso en baños termales y calefacción se inició en el campo de Larderello, Italia, a fines del siglo XVIII y principios del siglo XIX; y el aprovechamiento de esta energía, pero con el fin de producir electricidad, data de los primeros años del siglo XX. En 1913 se instaló en Italia la primera Planta Geotermoeléctrica con una capacidad de 250 kW y el interés por la nueva tecnología fue difundido lentamente a otros lugares. A principios de 1932, Nueva Zelanda, contando con numerosas manifestaciones termales, aprovechó el desarrollo de este nuevo recurso; pero no fue hasta 1958 que se construyó la primera planta y en 1963 la segunda, para una capacidad total de 192.6 MW. En 1943, Islandia utilizó las aguas termales para calefacción y hasta 1969 produjo energía eléctrica con vapor geotérmico.

Durante la década de los 60's, intensos trabajos de exploración fueron rea-

lizados por Nueva Zelanda, Japón y Estados Unidos de Norteamérica, los cuales lograron tomar una gran ventaja con respecto al desarrollo que tuvieron en esta área los demás países. En la década de los 70's, la energía geotérmica llegó a tener gran auge con el incremento de la capacidad eléctrica en los Geysers, California, EE UU, desde 78 MW en 1970 a 237 MW a fines de 1972; con el comienzo de la construcción de una planta en Cerro Prieto, México y el continuo desarrollo de los sistemas de calefacción y agricultura en Islandia, la Unión Soviética y Hungría.

La exploración geotérmica aumentó constantemente desde 1970 a 1972, con sustancial esfuerzo en Italia, Japón, Islandia, Estados Unidos de Norteamérica, Indonesia, las Filipinas y México. Este lento incremento, se aceleró bruscamente en 1973 cuando la crisis petrolera puso en dificultades a muchos países para importar petróleo debido al aumento tan severo en los precios. Esta problemática combinada con la evidente limitación de los recursos energéticos convencionales, aumentó más el interés por diversificar las fuentes de energía geotérmica; sobre todo en los países más afectados.

El aprovechamiento de la energía geotérmica se desarrolló hasta un punto tal, que aún cuando no ha llegado a ser la solución total a las necesidades de electricidad, sí es un apoyo importante; ya que hasta el momento se cuenta con una capacidad mundial instalada digna de tomarse en cuenta. A continuación se mencionan las capacidades eléctricas instaladas de los principales países que utilizan la energía geotérmica para la producción de electricidad.

- ESTADOS UNIDOS DE NORTEAMERICA. El más grande complejo geotérmico en el mundo está localizado en los Geysers en el condado de Sonoma en el norte de California. Este campo geotérmico tenía en junio de 1982 una capacidad instalada de 908 MW con 16 unidades turbogeneradoras operando y una capacidad probada de más de 2000 MW. El interés por el desarrollo geotérmico se ha manifestado por empresas privadas y por el gobierno, realizando exploraciones y explotaciones en los siguientes lugares: East Mesa, California con una unidad de ciclo binario de 11.2 MW; North Brawley, California con una unidad de una etapa de separación de 10 MW; Puna, Hawaii con una pequeña

unidad de 3 MW y Raft River con una unidad de ciclo binario de 5 MW.

- LAS FILIPINAS. Tiene una capacidad instalada de 466 MW, repartidos en los siguientes campos geotérmicos: Tiwi, es el principal desarrollo geotérmico filipino y cuenta en la actualidad con 6 unidades de 55 MW cada una. Se tiene planeada la construcción de 4 unidades más de 55 MW, dando una capacidad total de 550 MW para 1985; Tongonan, cuenta con dos unidades instaladas de 37.5 MW cada una y se planea la construcción de 6 unidades de 55 MW cada una dando una capacidad instalada para 1985 de 410 MW; Mak-Ban, tiene 4 unidades de doble evaporación-separación de 55 MW cada una. Otras zonas a explotar en las Filipinas son: Palimpinon, Manito y Daklan.

- ITALIA. Es el país pionero en la utilización de la energía geotérmica para generar electricidad, caracterizándose por tener campos con reservorios de vapor dominante. Tiene una capacidad instalada de 417.6 MW repartidos en tres campos, como sigue: 380.6 MW en Larderello, 15 MW en Travale y 22 MW en Monte Amiata.

- NUEVA ZELANDA. Tiene una capacidad instalada de 202.6 MW en dos campos geotérmicos. Wairakei tiene una capacidad instalada de 192.6 MW y cuenta con 13 unidades; éste es el primer campo a nivel comercial para la utilización de los recursos geotérmicos en la generación de energía eléctrica. Kawerau cuenta con una unidad de simple evaporación-separación, de 10 MW. Existen planes futuros para la explotación del campo geotérmico Ohaki con 3 unidades de 50 MW cada una.

- JAPON. Es el único país que tiene instaladas plantas geotérmicas de vapor seco de simple y doble evaporación-separación, y tipo binario. Tiene un ambicioso programa de desarrollo para llegar a tener en el año 2000 una capacidad instalada de 48 000 MW. Además, tiene una capacidad instalada de 177.5 MW repartidos en las siguientes plantas: Matsukawa con 22 MW, Otake con 12.5 MW, Onuma con 10 MW, Onikobe con 25 MW, Hatchobaru con 55 MW, Kakkonda con 50 MW y Suginoi con 3 MW.

- EL SALVADOR. Cuenta en la actualidad con sólo un campo geotérmico en ex-

plotación, Ahuachapan, que tiene dos unidades de simple evaporación-separación de 30 MW cada una y otra de doble evaporación-separación de 35 MW. Se está desarrollando un campo llamado Berlin para instalar, en 1985, una unidad de 55 MW.

- ISLANDIA. En este país el principal uso del fluido geotérmico es en la calefacción, aproximadamente el 65% de la población calienta sus habitaciones con la energía geotérmica. Actualmente se tiene una capacidad instalada de 41 MW repartidos en tres campos: Namafjall, Krafla y Svartsengi. Existen más campos geotérmicos en Islandia, pero únicamente dedicados a la calefacción.

- LA UNION SOVIETICA. Según los datos obtenidos, existen únicamente dos plantas de energía geotérmica. Pauzhetka con una etapa de evaporación-separación y 11 MW de capacidad, y Paratunka de ciclo binario y 0.68 MW de capacidad. Esta última planta se encuentra desmantelada para inspección, ya que se trata de una unidad de tipo experimental.

En la actualidad se encuentran instaladas a nivel mundial arriba de 120 unidades turbogeneradoras operando en base a la energía geotérmica. Con lo explicado anteriormente y los datos recolectados hasta junio de 1982<sup>(1)</sup>, las capacidades y número de unidades pueden ser resumidas en la tabla 1.1.

El crecimiento de la capacidad geotermoeléctrica mundial entre los años 1979 y 1982 fue del 45% y para el año de 1984 la capacidad instalada será un poco mayor a los 4400 MW, significando un incremento del 150% a partir de la capacidad de generación de 1979. ( Ver figura 1.1 ).

---

(1) Dippipo, R. Overview of Worldwide Geothermal Power Development. Proc. 6th. Annual Geothermal Conference and Workshop, November 1982.



PAIS	NUMERO DE UNIDADES EN OPERACION EN JUNIO/82	CAPACIDAD INSTALADA EN JUNIO/82 EN MW.	CAPACIDAD ESTIMADA EN JUNIO/84 EN MW.
E.E.U.U.	20	938.8	1663.8
Filipinas	11	446.0	891.0
Italia	40	439.6	463.6
N. ZELANDA	14	202.6	202.6
México	5	180.0	400.0
Japón	7	177.5	227.5
El Salvador	3	95.0	95.0
Islandia	5	41.0	41.0
Kenya	1	15.0	30.0
U.R.S.S.	1	11.0	21.0
China	10	6.6	9.8
Azores	1	3.0	3.0
Indonesia	2	2.2	32.2
Turquía	1	0.5	30.5
TOTAL	121	2 558.88	4 111.13

Tabla 1.1

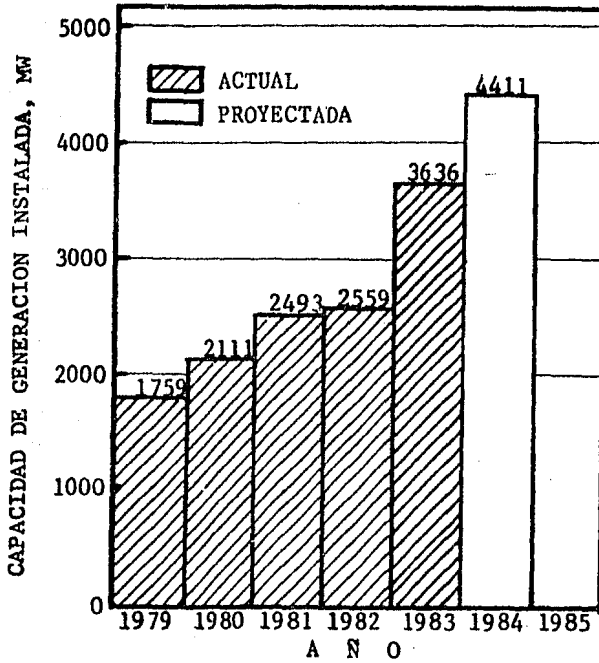


Fig. 1.1

En la tabla 1.2 se clasifican las actuales plantas de acuerdo a su tipo. Con esto podemos concluir que aproximadamente el 46% de las unidades operan en campos de vapor seco, el 26% son unidades de una etapa de evaporación-separación, el 13% son de doble evaporación-separación, el 8% con más de dos etapas de evaporación-separación y el 6% son binarias.

TIPO DE PLANTA	UNIDADES EN OPERACION		CAPACIDAD INSTALADA	
	NUMERO	% DEL TOTAL	MW	% DEL TOTAL
Vapor seco	56	46.3	1369.6	53.5
Simple separación	31	25.6	385.1	15.1
Doble separación	16	13.2	683.0	26.7
Más de dos etapas de separación	10	8.3	102.6	4.0
Binario	7	5.8	16.9	0.7
Flujo total	1	0.8	1.6	0.1
TOTAL	121	100.0	2 558.88	100.0

Tabla 1.2 Tipo de Unidades Instaladas

## 1.2 DESARROLLO GEOTERMICO EN MEXICO.

Alrededor del año de 1955 se iniciaron en México los primeros estudios exploratorios geológicos, geofísicos y geoquímicos que conducirían más adelante al aprovechamiento del calor del subsuelo para la generación de energía eléctrica. Estas exploraciones se iniciaron a lo largo del Eje Neovolcánico, el cual atraviesa a la República Mexicana de este a oeste.

Del gran número de áreas que se localizaron con manifestaciones termales superficiales, fue seleccionada la de Pathé, ubicada al este de la ciudad de Pachuca, en el estado de Hidalgo. En 1959 fue instalada, en esta área, una pequeña planta generadora de 3.5 MW utilizando una turbina sin condensación, la cual tuvo que ser cerrada debido a problemas en los pozos. La experiencia adquirida y los resultados obtenidos en esta planta piloto, impulsó al gobierno mexicano a continuar en la búsqueda y aprovechamiento de este recurso energético. Fue así que se empezó el estudio y exploración de varias otras zonas como la de Cerro Prieto en Baja California Norte, la de Los Azufres y Los Negritos en Michoacán, y muchas otras. Por su importancia y posibilidades la zona de Cerro Prieto se estudiará más afondo en el Capítulo 3.

En la República Mexicana existen diversas áreas en que se tienen zonas donde la energía geotérmica ofrece la posibilidad de generar cantidades importantes de electricidad. Una de las principales es la región de Mexicali, la cual se localiza en una de las zonas del mundo donde se presenta el fenómeno de separación de placas terrestres que a lo largo del sistema de la falla de San Andrés ha creado una zona de debilidad en la que la roca fundida se acerca a la superficie terrestre transmitiendo su calor al agua de los acuíferos subterráneos. Otra región mayor que la anterior es la que se conoce como Eje Neovolcánico, en la que se tienen detectadas más de 320 manifestaciones superficiales de energía calorífica, de gran importancia.

Entre las programas futuros para la zona de Mexicali, están la exploración de Riito, que se localiza a 46 km al sureste del campo de Cerro Prieto, al borde del Desierto del Altar, en los límites de los estados de Sonora y Baja California Norte. Por otra parte, en Tulechek al norte de Cerro Prieto y

a 12 km de distancia, también se han realizado estudios exploratorios geológicos, geofísicos y geoquímicos, que definieron la zona con elevadas probabilidades de existencia de un yacimiento geotérmico.

En el centro del país, a lo largo del Eje Neovolcánico, que se caracteriza por condiciones geológico-estructurales favorables para la constitución de zonas con temperaturas anómalas, se localiza una gran región con manifestaciones termales que tiene cuando menos 100 ó 120 campos geotérmicos, que prometen un potencial considerable para la generación de electricidad. Entre ellos destacan Los Azufres, Araró, Zimirao, Los Negritos e Ixtlán, en el estado de Michoacán; La Primavera, Los Hervores y San Marcos, en Jalisco; La Ciénega y Agua Caliente, en Sinaloa; Puruagüita y Comanjilla, en Guanajuato; y Tolimán y Chichonal, en Chiapas. En esta región central se realizan estudios de investigación preliminar, utilizando imágenes de satélite y confirmación terrestre, que permiten individualizar zonas relativamente más atractivas, en las que se ejecutan levantamientos geológicos, geofísicos y geoquímicos de carácter general, conjuntamente con el inventario de focos térmicos. Los trabajos de detalle para determinar la potencialidad de un campo e iniciar las perforaciones exploratorias y/o de producción se han concentrado en Los Azufres y Araró, en el estado de Michoacán; en Los Humeros, Puebla, y en La Primavera y San Marcos, en Jalisco.

Las perforaciones exploratorias se iniciaron en Los Azufres en el año de 1976, en un área de 25 km<sup>2</sup> se encontró producción entre los 1200 y 1500 m de profundidad. La producción por pozo varía de 40 ton/h de vapor hasta unas 120 ton/h. Los pozos de Los Azufres producen a través de un sistema de fallas este-oeste y de fracturas secundarias perpendiculares al sistema principal. El yacimiento, cuyas características se han determinado a través de un modelo matemático y de trabajo de campo, tiene un espesor del orden de 800 m, un desarrollo de 30 km<sup>2</sup> y temperaturas de fondo de 300° C.

Es importante señalar que la mayor parte de los pozos producen mezcla agua-vapor pero hacia su parte sur, en el llamado módulo de Tejamaniles, se ha determinado una zona en que la producción de los pozos es de vapor seco.

Con objeto de conocer con profundidad la respuesta del yacimiento al ser explotado, se decidió instalar cinco turbogeneradores portátiles de 5 MW cada uno, que operan a boca de pozo, con descarga atmosférica. Por las características de la mezcla que se obtiene en este campo, así como la indisponibilidad de áreas para su desecho, será necesario reinyectar la totalidad del agua separada con objeto de no producir contaminación en la zona.

En el campo de La Primavera, ubicado a 5 km al poniente de la ciudad de Guadalajara, en el estado de Jalisco, también se han llevado a cabo desde hace varios años estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos, así como perforaciones exploratorias. De los pozos perforados, los volúmenes que se obtienen son reducidos; lo mismo sucede con la entalpía, que es baja, por lo que se considera que no podrán utilizarse en turbogeneradores geotérmicos. Se ha estructurado un proyecto a futuro que contempla su utilización en equipos de ciclo binario.

En el estado de Puebla, cerca de la ciudad de Perote, se llevaron a cabo estudios geológicos y geoquímicos que cubrieron una superficie de  $700 \text{ km}^2$  y ayudaron a los estudios de detalle en el campo de Los Humeros. Las perforaciones se iniciaron con el estudio de dos pozos, uno de ellos a los 1500 m produjo 120 ton/h de mezcla agua-vapor con una relación aproximada de 1:1.

En proceso de perforación exploratoria, se encuentran el campo geotérmico de Araró, localizado en la porción periférica sur del lago de Cuitzeo, en Michoacán, y el de San Marcos ubicado a 60 km al occidente de la ciudad de Guadalajara.

Indudablemente que por las características geológicas, volcánicas y estructurales que se presentan en la República Mexicana, la posibilidad de aprovechar los recursos geotérmicos es de una gran importancia; esto, aunado a la política de diversificación de energéticos primarios, coloca a México, en lo que se refiere a la futura utilización de la energía geotérmica para la generación de electricidad ( Ver figura 1.2 ), en una posición muy especial para el aprovechamiento de este recurso.

Es además de primordial importancia, hacer resaltar que a la fecha México es uno de los países más adelantados del mundo en el aprovechamiento de este tipo de energía.

En la tabla 1.3 se muestra el tipo, capacidad y estado actual de cada una de las unidades generadoras instaladas o que están por instalarse.

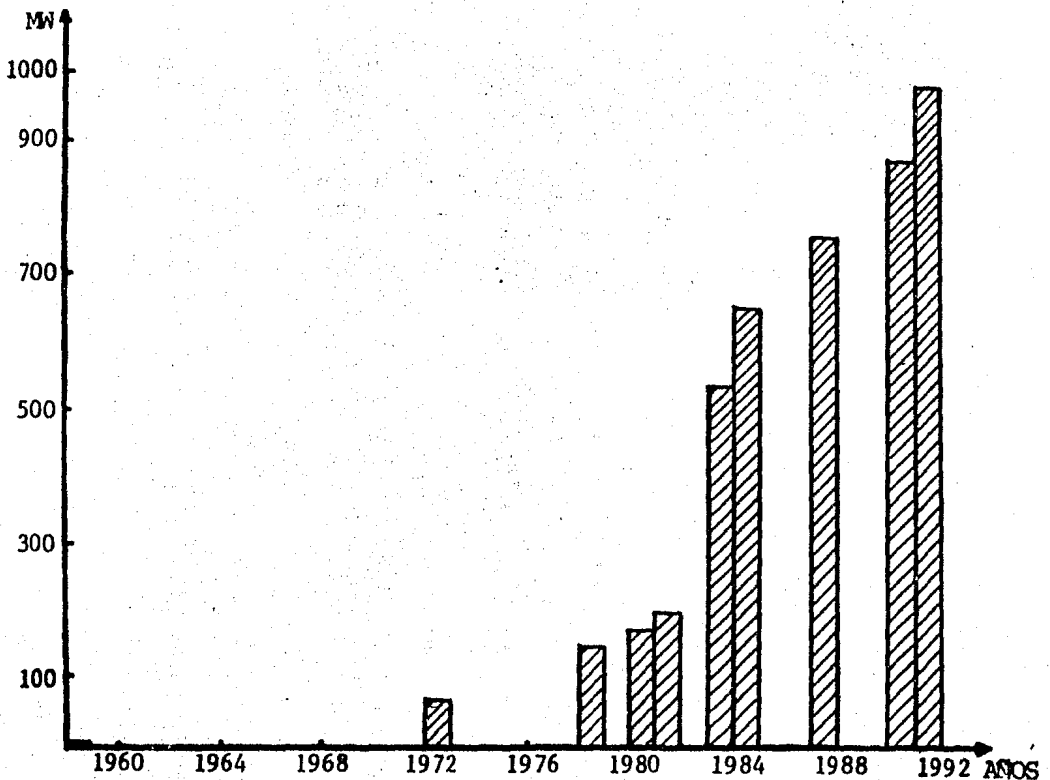


Fig. 1.2 Evaluación de la Capacidad Geotérmica en México

NOTA: Los datos registrados en esta gráfica fueron tomados del POISE ( Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico ) Fecha: 15-Agosto-83.

NOMBRE	AÑO	TIPO	MW	ESTADO
Pathé	1959	1-ES	3.5	No operando
Cerro Prieto I:				
Unidad 1	1973	1-ES	37.5	Operando
Unidad 2	1973	1-ES	37.5	Operando
Unidad 3	1979	1-ES	37.5	Operando
Unidad 4	1979	1-ES	37.5	Operando
Unidad 5	1981	2-ES	30.0	Operando
Cerro Prieto II:				
Unidad 1	1984	2-ES	110.0	En construcción
Unidad 2	1984	2-ES	110.0	En construcción
Cerro Prieto III:				
Unidad 1	1984	2-ES	110.0	En construcción
Unidad 2	1985	2-ES	110.0	En construcción
Cerro Prieto IV:				
Unidad 1	1992	2-ES	110.0	Programada
Los Azufres:				
Unidad a boca de pozo 1	1982	1-ES	5.0	Operando
Unidad a boca de pozo 2	1982	1-ES	5.0	Operando
Unidad a boca de pozo 3	1982	1-ES	5.0	Operando
Unidad a boca de pozo 4	1982	1-ES	5.0	Operando
Unidad a boca de pozo 5	1982	1-ES	5.0	Operando
Los Azufres I:				
Unidad 1	1988	2-ES	55.0	Programada
Unidad 2	1988	2-ES	55.0	Programada
Los Azufres II:				
Unidad 1	1991	2-ES	55.0	Programada
Unidad 2	1991	2-ES	55.0	Programada
ES = Etapas de Separación				

Tabla 1.3 Plantas Geotermoeléctricas en México

NOTA: Los datos reportados en esta tabla fueron tomados del POISE ( Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico ) Fecha: 16-Agosto-83.



### 1.3 LA ENERGIA GEOTERMICA.

Con la tecnología de que se dispone en la actualidad, la energía geotérmica ofrece, en algunas regiones del mundo, la posibilidad de generar cantidades importantes de electricidad. A nivel local, este recurso tiene un atractivo aún mayor, competir ventajosamente en costos con la electricidad producida por plantas térmicas convencionales, ya que tan sólo la cantidad de hidrocarburos que se dejan de consumir para generar energía eléctrica implica un gran ahorro.

Por lo anterior su desarrollo está en auge en aquellos sitios donde se presenta la combinación de fracturas terrestres y mantos acuíferos que permiten obtener vapor mediante la perforación de pozos, esto es, en los sitios en que se conjugan condiciones geológicas favorables para la utilización de esta energía.

#### 1.3.1 Aspectos Generales.

Es indudable que el interior de la tierra es caliente ya que observaciones hechas en pozos profundos muestran un aumento de  $1^{\circ}$  C por cada 30 m de profundidad, dependiendo de las características geológicas del terreno. El origen del calor interior de la tierra todavía no ha sido aclarado del todo; hay dos teorías que tratan de explicar dicho origen, las cuales son:

- 1) El calor interno es simplemente un resto del formado en un estado fundido original de la tierra, el cual permanece caliente algunos kilómetros por debajo de la superficie. Las pérdidas de calor están condicionadas por la conductividad de las rocas y por las diferencias de temperatura en profundidad.
- 2) Si hay una zona cerca de la superficie donde las rocas sean relativamente ricas en sustancias radiactivas ( uranio y torio ), el calor producido por la radiactividad en estos sitios se acumularía lentamente puesto que las rocas son malas conductoras de calor. Este calor, eventualmente, después de pasar mucho tiempo, llega a ser tan grande como para licuar las rocas y producir masas de magma.

La teoría de la radiactividad es probablemente la más aceptada, además indica una tendencia de la idea geológica que difiere de la de hace un siglo, cuando quienes estudiaban la historia de la tierra afirmaban que ésta se refrigeraba por que despidió calor.

Dentro de la corteza terrestre existen capas permeables que se encuentran fracturadas y fisuradas, que descansan sobre capas impermeables que cubren el magma localizado en el núcleo de la tierra. Por medio de estas fisuras y fracturas el agua pasa y hierve debido al alto flujo de calor existente. La energía que absorbe dicha agua puede aprovecharse para la producción de energía eléctrica. Esta agua caliente se suele acumular en diversas zonas del planeta y se les conoce con el nombre de Reservorios Geotérmicos.

Despreciando complejos detalles geológicos de la formación de un reservorio natural de fluido caliente es posible esquematizarlo en la manera mostrada en las figuras 1.3 y 1.4.

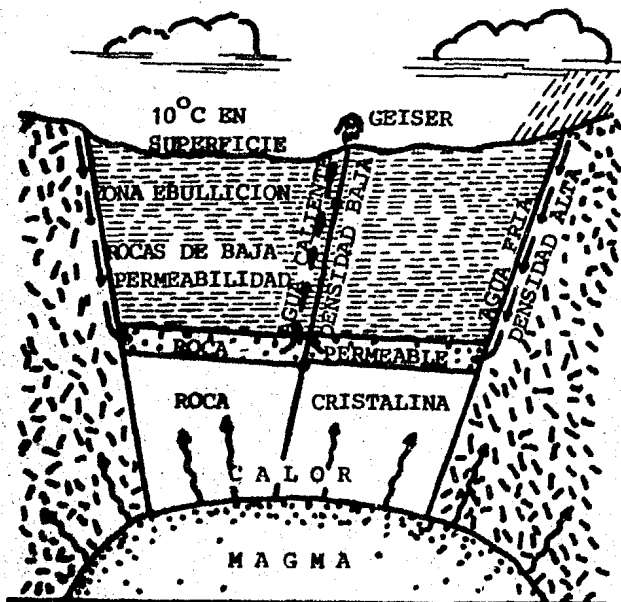


Fig. 1.3 Características de un reservorio geotérmico.

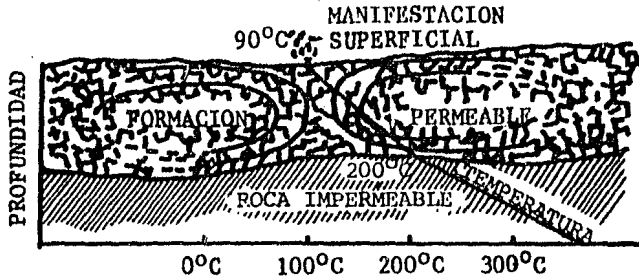


Fig. 1.4 Celdas convectivas en un reservorio geotérmico mostrando la distribución de temperatura.

A estos reservorios se les ha clasificado en dos grandes grupos:

- 1) Vapor dominante.
- 2) Líquido dominante.
  - a) Alta entalpía.
  - b) Baja entalpía.

El reservorio de vapor dominante produce vapor ligeramente sobrecalentado a una temperatura alrededor de  $250^{\circ}\text{C}$  y una presión de 30 a 35 bar. El reservorio generalmente consta de rocas porosas y grandes fracturas, cuentan con un flujo de aproximadamente 250 000 kg/h a una profundidad de 1000 a 2500 m.

El reservorio de líquido dominante puede ser dividido en dos tipos: uno teniendo fluido de alta entalpía ( 200 kcal/kg ) y otro teniendo fluido de baja entalpía. Esta división tiende a separar el fluido para la producción de electricidad más que para otros propósitos.

Una diferencia importante entre el reservorio de líquido dominante y el reservorio de vapor dominante es que la presión en el de líquido dominante está cerca de la presión hidrostática, o sea, 0.1 bar por metro de profundidad así pues, en una profundidad de 1000 a 2500 m la presión es de 100 a 250 bar a comparación de los 30 a 35 bar en el reservorio de vapor dominante.

Los reservorios de fluido con alta entalpía contienen agua con sólidos di-

sueltos de 2000 a 260 000 ppm, y una temperatura de 200 a 388° C. El anión predominante en los sólidos disueltos es el cloruro, y el sodio y el potasio son los principales cationes. La perforación de pozos en este tipo de reservorios produce una mezcla de agua-vapor; el vapor puede ser separado a una presión adecuada para operar una turbina convencional.

Los reservorios de fluido con baja entalpía tienen propiedades muy variables por ejemplo, en algunos reservorios el anión sulfato puede ser el dominante y en otros el carbonato-bicarbonato; la salinidad tiende a ser baja, y algunos reservorios podrían ser considerados como potables; el contenido de sílice, el cual es una función de la temperatura, es menor y finalmente el rango de temperatura es de 10 a 200° C. Esta categoría incluye agua encontrada en algunos depósitos sedimentarios donde el exceso de roca tiene una baja conductividad, el rango de temperatura puede estar entre 50 y 120° C, pero los reservorios son muy grandes.

Como el líquido circula a través de estratos permeables, disuelve pequeña o gran cantidad de minerales, tales como cloruro de sodio ( NaCl ), cloruro de potasio ( KCl ), cloruro de calcio ( CaCl<sub>2</sub> ), etc. y algunos gases, los más frecuentes son bióxido de carbono ( CO<sub>2</sub> ) y nitrógeno ( N<sub>2</sub> ).

Concretamente se define como zona geotérmica, a una porción de la corteza terrestre en la cual el gradiente de temperatura es mucho mayor que el normal ( se considera gradiente normal 1° C por cada 30 m de profundidad ).- Cuando una zona o área geotérmica se encuentra en explotación se le define como Campo Geotérmico.

#### Características de los Campos Geotérmicos.

Son relativamente numerosas las regiones de la tierra en las que se observan directamente manifestaciones termales, pero en contados casos estas manifestaciones se utilizan para producir energía eléctrica. Es obvio, sin embargo, que el aprovechamiento de la energía geotérmica podría contribuir notablemente al progreso de los países llamados del Tercer Mundo y adquirir enorme importancia en aquellos que se están esforzando por iniciar un proceso de

industrialización. La disponibilidad de energía eléctrica a bajo costo tiene pues, un papel decisivo en la solución de problemas técnicos, económicos y sociales. Para poder aprovechar al máximo esta energía es necesario conocer las características más importantes de las áreas geotérmicas a explotar.

Las condiciones que debe cumplir un campo geotérmico para que sea explotable económicamente, son las siguientes:

- a) Existencia de un reservorio con elevada energía calorífica a relativa proximidad de la superficie terrestre.
- b) Estratigrafía adecuada del terreno, ya que es necesario que la composición geológica del terreno permita la transmisión de calor, ya sea por el sistema de fallas que lo forman o la sedimentación del terreno.
- c) Estructura geológica compacta sobre el reservorio, pues es necesario evitar que el fluido transportador de calor no se disperse ni se disipe para aprovechar mayor energía.

De acuerdo con sus características podemos encontrar dos tipos de campos que son explotables económicamente.

- 1) Campos hipertérmicos.
- 2) Campos semitérmicos.

Los primeros son los que proporcionan energía de alta calidad, o sea, adecuada para la generación de energía eléctrica, y que por lo regular se encuentran confinados en una sola zona llamada Cinturón Sísmico, esta zona marca los límites de las capas tectónicas. Debido al movimiento de estas capas, sus límites forman zonas débiles a través de las que penetra el material caliente o magma proveniente del manto inferior y que puede surgir formando un volcán o simplemente forma una intrusión magnética. Estas intrusiones magnéticas proporcionan un incremento de temperatura, zonas de alto flujo de calor, y por lo tanto, el agua que se filtra hasta esas zonas alcanza una alta temperatura que se aprovechará para generar energía eléctrica. Este

tipo de campos hipertérmicos se pueden localizar fácilmente debido a sus manifestaciones en forma de volcanes, fumarolas, etc.

En el caso de la segunda clase de campos geotérmicos están los que se encuentran más alejados del Cinturón Sísmico, también poseen en su interior agua, pero de baja temperatura, o sea, de  $100^{\circ}$  F o menos. Estos campos son propios para utilizar su energía en calefacción, suministro de agua caliente agricultura, etc. ( a veces se pueden utilizar para la generación de energía eléctrica ). Probablemente, estos campos semitérmicos se crean a partir de una combinación de factores, como: anomalías en la corteza terrestre que provocan puntos calientes en el manto inferior, etc.. Este tipo de campos no se pueden detectar fácilmente, excepto cuando surgen fuentes calientes.

### 1.3.2 Descripción de los Ciclos Térmicos.

El fluido caliente extraído de un pozo geotérmico contiene una considerable cantidad de energía interna y energía de flujo, que puede convertirse en trabajo disponible en la flecha de una turbina y, finalmente, en energía eléctrica. Este fluido, cuando se extrae, puede encontrarse en forma de líquido ( agua caliente ), vapor seco o bien como una mezcla de agua-vapor; dependiendo de esto y de sus características termodinámicas ( presión, temperatura, entalpía, etc. ), pueden seleccionarse diferentes ciclos para el mejor aprovechamiento de la energía contenida en dicho fluido.

Una de las características principales de la mayoría de los ciclos térmicos utilizados para la generación de energía eléctrica a partir de la energía geotérmica es que son ciclos abiertos, es decir, el fluido de trabajo no sigue una trayectoria cerrada definida. Primeramente el fluido es extraído del subsuelo, después realiza trabajo en una turbina y finalmente es desechado o utilizado como agua de enfriamiento.

Existen muchas variantes de los ciclos, en cuanto al arreglo del equipo y a la utilización de varios ciclos conjugados en la misma planta. A continuación se describen los principales ciclos térmicos utilizados en la generación de energía eléctrica, empleando fluido geotérmico.

### Ciclo Simple.

El ciclo simple es aquel en el que se utiliza, en un ciclo Rankine, el vapor seco como fluido de trabajo. Existen diferentes variantes en este tipo de ciclo, con respecto al tipo de fluido geotérmico que se tenga en la boca del pozo.

En los campos en donde se extrae vapor seco ( o ligeramente sobrecalentado ) el vapor simplemente se conduce del pozo a la turbina a través de tuberías, instalándose antes de ésta un separador para eliminar las impurezas que arrastra el vapor, después se envía a una turbina convencional donde cede parte de su energía y por último se pasa a un condensador. Este ciclo se muestra en la figura 1.5.

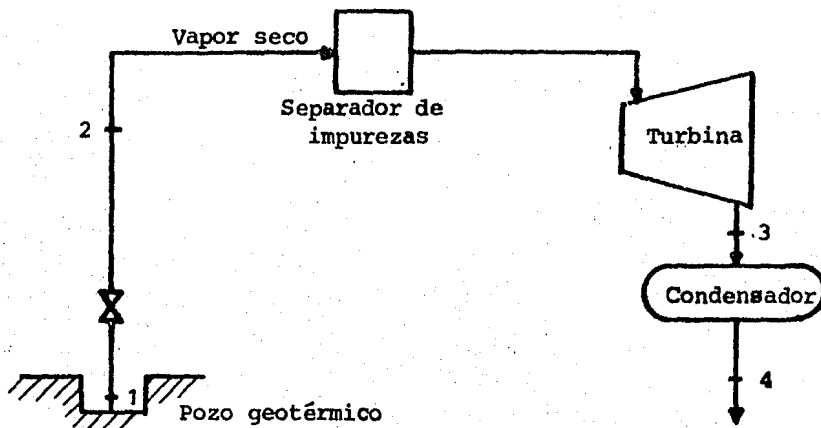


Fig. 1.5 Ciclo Simple ( vapor seco ).

La no utilización de un condensador queda restringida sólo a casos en los cuales, además del vapor seco, se extraen gran cantidad de gases no condensables, principalmente, bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ); tampoco se utiliza condensador tratándose de plantas portátiles chicas, las cuales son utilizadas al inicio de la explotación de un campo geo-

térmico. Una vez que el vapor geotérmico a sido condensado, una parte puede servir como agua de repuesto del sistema de enfriamiento y el resto puede ser depositado en una laguna, mar o río, pudiéndose reinyectar al subsuelo para no agotar rápidamente el manto de agua.

Ahora bien, la representación de este ciclo en el diagrama temperatura-entropía es como se muestra en la figura 1.6.

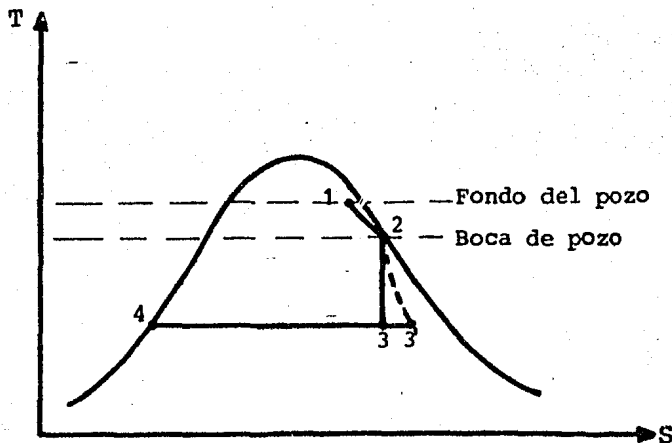


Fig. 1.6 Diagrama Temperatura-Entropía ( vapor seco ).

**Procesos:**

- 1-2 Expansión en el interior del pozo.
- 2-3 Expansión adiabática en la turbina.
- 2-3' Expansión real en la turbina.
- 3-4 Condensación.

En los campos geotérmicos en los que se extrae una mezcla de agua-vapor, se hace pasar ésta por un evaporador-separador, donde parte del agua se evapora a una presión determinada. El vapor se conduce a la turbina; por otro lado, el agua remanente es separada y desechada. Este ciclo se representa en la figura 1.7 y su diagrama temperatura-entropía se muestra en la figura 1.8.



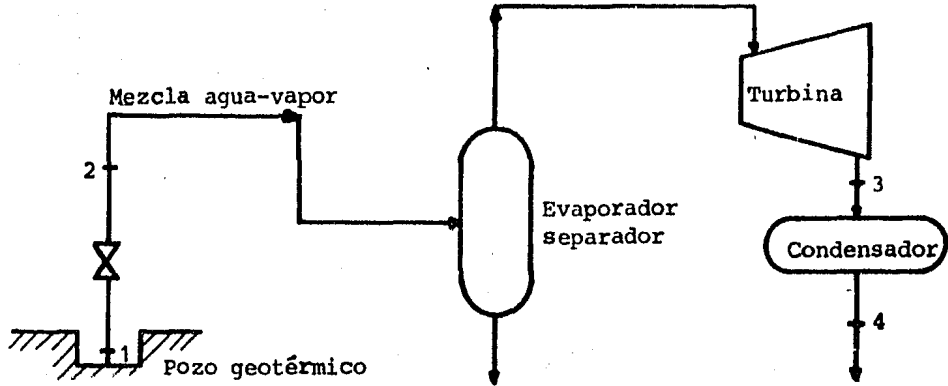


Fig. 1.7 Ciclo Simple (mezcla agua - vapor).

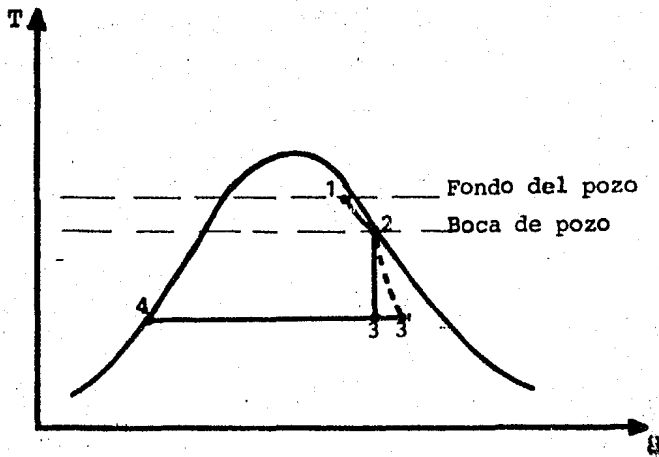


Fig. 1.8 Diagrama Temperatura-Entropía (mezcla agua - vapor).

Procesos:

- 1-2 Expansión en el interior del pozo.
- 2-3 Expansión adiabática en la turbina.
- 2-3' Expansión real en la turbina.
- 3-4 Condensación.

Ciclo con Evaporación-Separación Múltiple. Este ciclo es una modificación al ciclo simple, el cual permite aprovechar mejor la energía del fluido geotérmico, utilizando parte de la energía contenida en el agua caliente proveniente de los separadores, que en el ciclo simple es desechada.

Una de las formas para utilizar la energía contenida en el agua caliente saturada proveniente de un paso de separación anterior, es por medio de turbinas de baja presión. El agua saturada sale del primer separador y se lleva a un segundo paso de evaporación-separación, la cual se realiza a menor presión; por último, este vapor se conduce a la turbina de baja presión. Teóricamente pueden realizarse varios pasos de evaporación-separación; sin embargo en la práctica difícilmente convendría pasar de 2 ó 3 pasos como máximo debido a que las bajas presiones originan muchos problemas de incrustaciones ( En el Capítulo 2 se da una explicación más amplia de este caso, en base a la ganancia de energía disponible ). El valor de la mínima presión de evaporación dependerá del contenido y tipo de sales que se encuentren en el fluido geotérmico. Este ciclo se representa en la figura 1.9 y su diagrama temperatura-entropía se muestra en la figura 1.10.

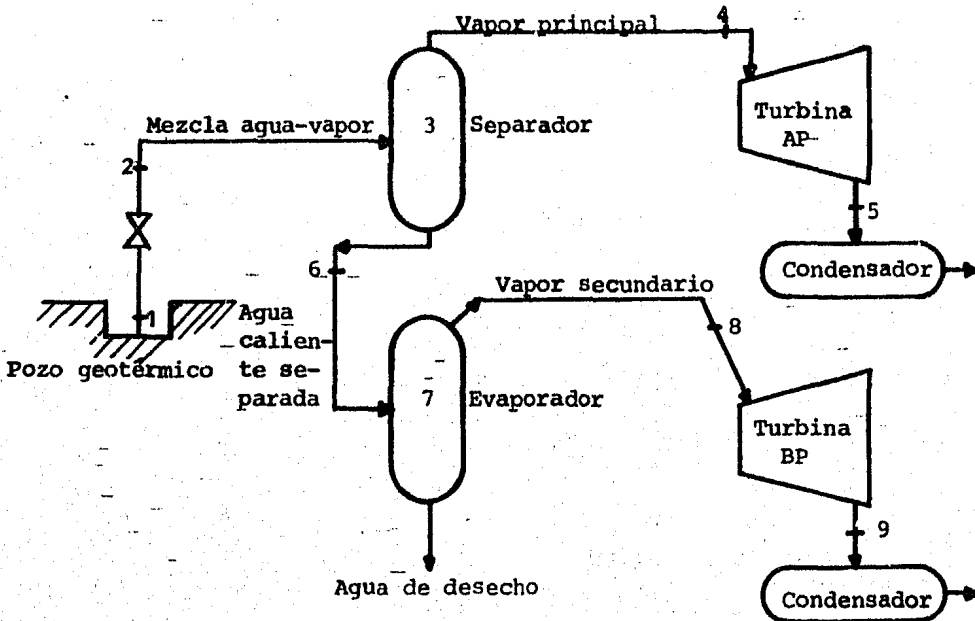


Fig. 1.9 Ciclo con doble evaporación-separación usando una unidad de baja presión.

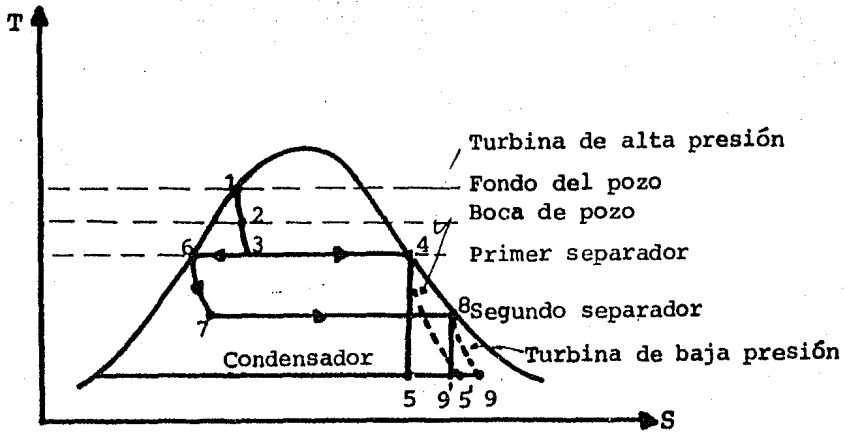


Fig. 1.10 Diagrama Temperatura-Entropía ( unidad de baja presión ).

Procesos:

- 1-2 Expansión en el interior del pozo.
- 2-3 Expansión en el primer separador.
- 3-4 Separación de vapor seco.
- 4-5 Expansión adiabática en la turbina de alta presión.
- 4-5' Expansión real en la turbina de alta presión.
- 3-6 Separación del líquido saturado.
- 6-7 Expansión en el segundo separador.
- 7-8 Separación de vapor seco.
- 8-9 Expansión adiabática en la turbina de baja presión.
- 8-9' Expansión real en la turbina de baja presión.

Otra forma de aprovechar el vapor proveniente de la evaporación del agua saturada, es con la utilización de turbinas de presión mixta. En esta turbina el vapor secundario es introducido a una presión intermedia entre la del vapor principal y la del condensador. Este arreglo, como se utiliza un sólo turbogenerador, representa un ahorro tanto en el equipo como en el espacio. Este ciclo se representa en la figura 1.11 y su diagrama temperatura-entropía se muestra en la figura 1.12.



Procesos:

- 1-2 Expansión en el interior del pozo.
- 2-3 Expansión en el primer separador.
- 3-4 Separación de vapor seco.
- 4-5 Primera expansión real en la turbina.
- 5-6 Mezcla con el vapor secundario.
- 6-7 Segunda expansión real en la turbina.
- 3-8 Separación de líquido saturado.
- 8-9 Expansión en el segundo separador.
- 9-10 Separación del vapor seco.
- 10-6 Mezcla con el vapor principal.

Ciclo Binario.

El fluido geotérmico, proveniente directamente de un pozo caliente o de una etapa anterior de separación, se hace pasar a través de intercambiadores de calor en los cuales cede su energía a otro fluido, que debido a su bajo punto de ebullición se transforma de fase líquida a fase gaseosa. El Freón 12 y el Isobutano son dos de los fluidos secundarios más utilizados para este ciclo, debido a sus propiedades termodinámicas.

El fluido secundario desarrolla un ciclo Rankine, teniendo como fuente de calor al fluido geotérmico. Este fluido realiza trabajo mecánico durante su expansión en la turbina, después es condensado y finalmente bombeado de nuevo al intercambiador de calor.

Algunas ventajas de la utilización del ciclo binario son las siguientes:

a) Permite aprovechar depósitos geotérmicos de baja temperatura, ya que el vapor que se expande en la turbina no es de agua sino de fluido secundario y se encuentra relativamente a baja temperatura; esto es, a la misma presión y temperatura no existiría vapor de agua.

b) Sólo una parte del equipo ( intercambiador de calor ) se encuentra en contacto con el fluido geotérmico, evitando así incrustaciones y corrosión

en la turbina, condensador, etc.

c) Evita la presencia de gases incondensables en el condensador, ahorrando la energía necesaria para expulsarlos.

Por otro lado, algunas de las desventajas de este ciclo son:

a) Las sustancias de trabajo son altamente tóxicas e inflamables, debiendo de tenerse mucho cuidado en su manejo y almacenamiento.

b) El fluido secundario tiene un alto costo.

En la figura 1.13 se muestra el ciclo binario descrito anteriormente y su diagrama temperatura-entropía se muestra en la figura 1.14.

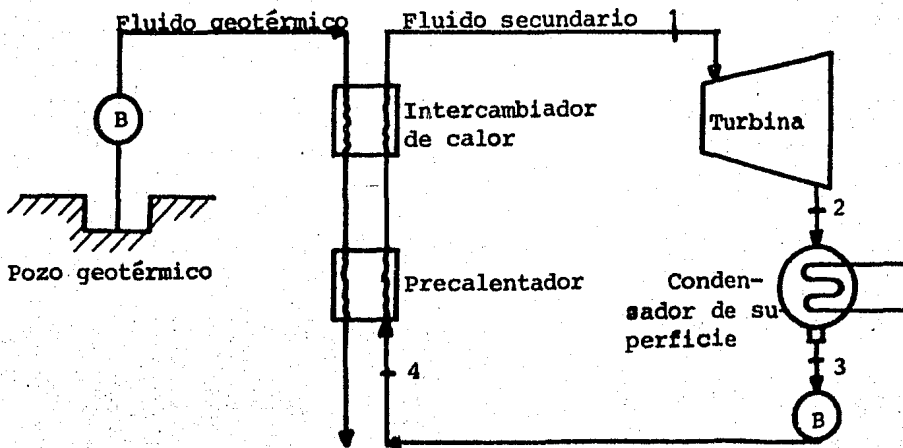


Fig. 1.13. Ciclo Binario.

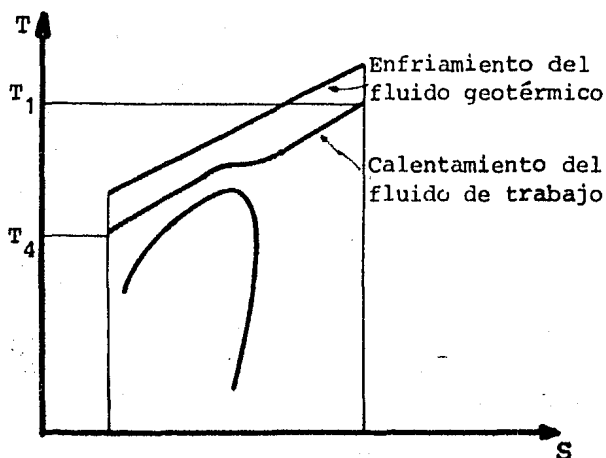


Fig. 1.14 Diagrama Temperatura-Entropía ( ciclo supercrítico ).

#### Ciclo de Flujo Total.

En el ciclo de flujo total se utiliza la expansión del fluido geotérmico en dos fases. La mezcla agua-vapor extraída de un pozo se conduce hacia una turbina de tipo hidráulico ( de impulso-reacción, flujo axial o radial ), en donde entrega parte de su energía. Finalmente el fluido que sale de la turbina se envía a un condensador de contacto directo, en donde se mezcla con el agua de circulación que proviene de una torre de enfriamiento. Este ciclo se muestra en la figura 1.15.

La turbina de impulso que se muestra en la figura 1.15 cuenta con una serie de toberas, en donde el fluido pierde presión y gana velocidad. En esta forma, el fluido sale de las toberas a altas velocidades y le imparte movimiento a la turbina al chocar con sus álabes.

Cabe señalar que se puede hacer uso de otros dispositivos en lugar de la turbina, tales como máquinas de desplazamiento positivo y ruedas Pelton; pero no tienen la misma eficiencia que la turbina en la transformación de la energía.

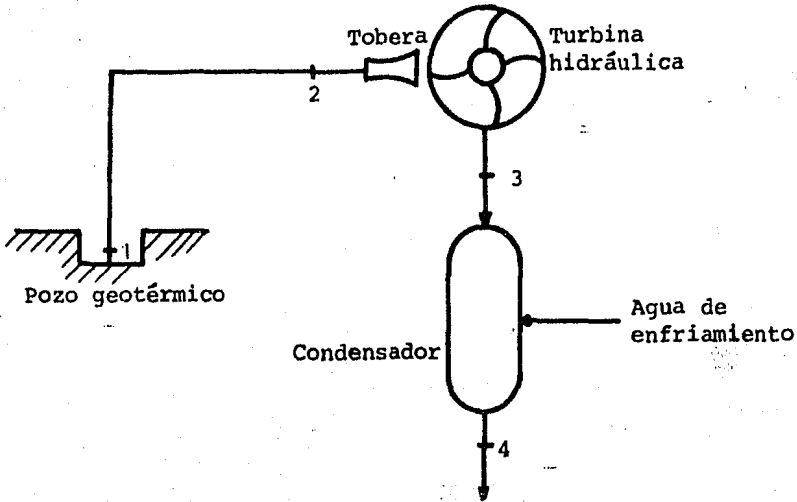


Fig. 1.15 Ciclo de Flujo Total ( turbina hidráulica ).

El condensador puede tener una modificación que permita recuperar la fracción de vapor para aprovecharla como agua de repuesto para el sistema de agua de circulación, el líquido restante puede reinyectarse o enviarse a un lugar determinado para su aprovechamiento o desecho. El diagrama temperatura entropía correspondiente a este ciclo se muestra en la figura 1.16.

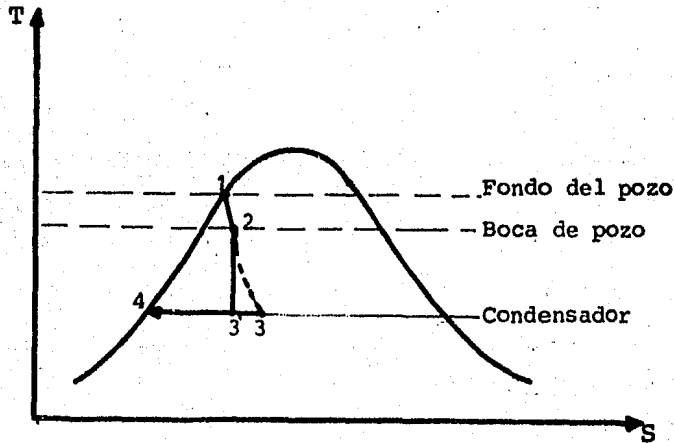


Fig. 1.16 Diagrama Temperatura-Entropía ( flujo total ).



Procesos:

- 1-2 Expansión en el interior del pozo.
- 2-3 Expansión real en la turbina hidráulica.
- 3-4 Condensación.

La principal ventaja de la utilización de este ciclo es que el fluido geotérmico no sufre pérdidas, ni de presión ni de temperatura, debido a su paso a través de separadores y evaporadores.

Las desventajas que presenta este ciclo se mencionan a continuación:

- a) Todos los componentes tienen que resistir una gran cantidad de sólidos disueltos, formación de incrustaciones y corrosión.
- b) La turbina gira a una velocidad mayor que la de sincronismo, debiendo de utilizarse reductores de velocidad para accionar el generador.

## CICLO CON DOS ETAPAS DE SEPARACION

### 2.1 CARACTERISTICAS TERMODINAMICAS.

Actualmente, en campos de líquido dominante la utilización de la energía contenida en el fluido geotérmico para generar electricidad a nivel comercial se realiza mediante la evaporación instantánea de dicho fluido, separando la fase líquida y aprovechando el vapor obtenido para accionar una turbina de vapor convencional. Este sistema se utiliza en los campos de Wairakei, Cerro Prieto, Hatchobaru y Ahuachapan entre otros.

Existe la inconveniencia de que solamente se produce una pequeña cantidad de vapor con una etapa de evaporación-separación, necesitándose varias etapas para lograr una cantidad mayor de vapor y mejorar así la eficiencia del proceso.

Termodinámicamente podrían existir un número infinito de etapas de evaporación, pero la ganancia de energía disponible en el vapor producido en cada

etapa sería cada vez menor.

Debido a lo anterior se realizará un análisis termodinámico para observar el incremento en generación y en la utilización del recurso geotérmico como resultado del aumento del número de etapas de evaporación-separación, proponiéndose tres alternativas para dicho análisis: Ciclo con una etapa de separación y turbina sencilla; ciclo con dos etapas de separación y turbina de presión mixta; y finalmente, ciclo con tres etapas de separación y dos turbinas, una sencilla y otra de presión mixta.

De estas tres configuraciones se realizarán balances de materia y energía para calcular la producción de energía eléctrica y el aprovechamiento de la energía contenida en el fluido geotérmico.

Los balances se realizarán de una manera simplificada, con las siguientes consideraciones:

- Se desprecian pérdidas de presión y de calor en las tuberías ( no se toma en cuenta la localización relativa de los equipos ).
- Los procesos de evaporación-separación son ideales ( Isoentálpicos e isobáricos ).
- Se utiliza agua pura como fluido de trabajo.
- Los procesos de mezcla en la turbina de presión mixta se consideran ideales

Las características de los tres balances térmicos presentados son tomadas de las publicadas por diversos autores<sup>(1,2)</sup>, siendo éstas las siguientes:

---

(1) Eduardo Hernández Goribar. Ciclos Térmicos en Plantas Geotermoeléctricas Para Generar Energía Eléctrica. Boletín IIE. Julio 1977. p.p. 7 a 9.

(2) Jorge A. Reza Chávez. Ciclos Alternativos de Energía Geotérmica. Boletín IIE. Abril 1979. p.p. 3 a 15.

- Presión primer separador = 7.9 bar abs. ( 115 psia )
- Presión separación intermedia = 3.45 bar abs. ( 50 psia )
- Presión separación baja = 1.4 bar abs. ( 20 psia )
- Gasto de fluido geotérmico = 1'200,000 kg/h
- Entalpía total = 1 333.72 kJ/kg

Se supusieron los siguientes datos del equipo:

- Eficiencia interna de las turbinas = 80%
- Eficiencia mecánica de las turbinas = 85%
- Eficiencia del generador eléctrico = 98%

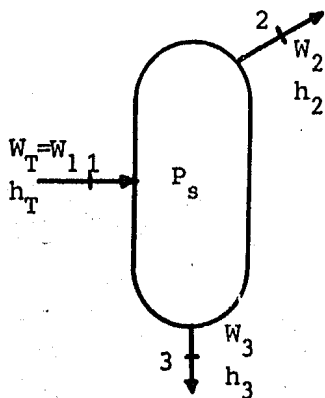
A continuación se presenta la lista de variables y las relaciones empleadas para el cálculo de los balances en cada uno de los equipos principales así como los resultados obtenidos en cada caso.

#### Lista de Variables.

- $h_T$  = Entalpía total [kJ/kg]
- $h_f$  = Entalpía de líquido saturado [kJ/kg]
- $h_g$  = Entalpía de vapor saturado [kJ/kg]
- $h_{fg}^g$  = Entalpía de vaporización [kJ/kg]
- $h_m$  = Entalpía de mezcla [kJ/kg]
- $s_T$  = Entropía total [kJ/kg K]
- $s_f$  = Entropía de líquido saturado [kJ/kg K]
- $s_{fg}^g$  = Entropía de vaporización [kJ/kg K]
- $s_m$  = Entropía de mezcla [kJ/kg K]
- $x$  = Calidad del vapor [decimal]
- $x_m$  = Calidad de la mezcla [decimal]
- $P_m$  = Presión [bar abs.]
- $W$  = Gasto másico [kg/s]
- $\eta_I$  = Eficiencia interna [decimal]
- $\eta_m$  = Eficiencia mecánica [decimal]
- $\eta_g$  = Eficiencia del generador [decimal]
- $P_{ot}$  = Potencia eléctrica [kW]

### Ciclo con una Etapa de Separación.

- Proceso en el separador.



$$h_2 = h_g \quad \text{a la presión de separación}$$

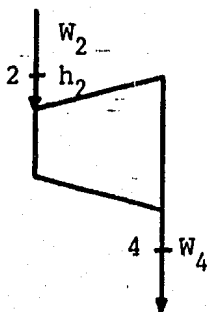
$$h_3 = h_f \quad \text{a la presión de separación}$$

$$x = \frac{h_1 - h_f}{h_g - h_f}$$

$$W_2 = W_1 x$$

$$W_3 = W_1 (1 - x)$$

- Proceso en la turbina.



Considerando proceso isoentrópico:

$$s_{4s} = s_2 = s_{f4s} + x s_{fg4s}$$

Donde:

$$s_{f4s} \text{ y } s_{fg4s} \quad \text{a la presión del condensador}$$

$$x = \frac{s_2 - s_{f4s}}{s_{fg4s}}$$

Por lo tanto:

$$h_{4s} = h_{f4s} + x h_{fg4s} \quad ; \quad h_{f4s} \text{ y } h_{fg4s} \quad \text{a la presión del condensador}$$

Considerando la eficiencia interna:

$$\eta_I = \frac{h_2 - h_{4R}}{h_2 - h_{4s}}$$

$$h_{4R} = h_2 - \eta_I (h_2 - h_{4s})$$

Potencia Eléctrica Generada:

$$\text{Pot} = W_2 (h_2 - h_{4R}) \times 1/3600 \times \eta_m \times \eta_g$$

En la figura 2.1 se muestra el balance térmico del ciclo con una etapa de separación.

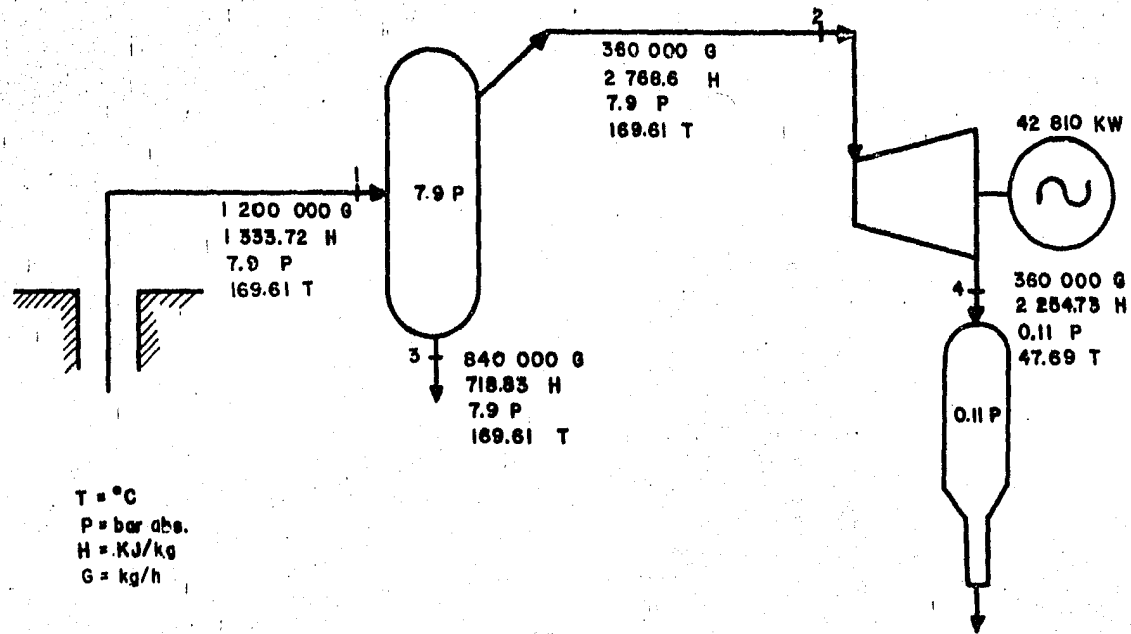
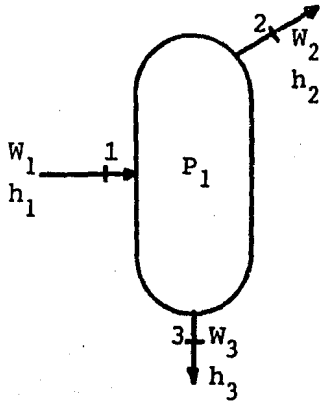


Fig. 2.1 Balance Térmico con una Etapa de Separación.

Ciclo con dos Etapas de Separación.

- Proceso en el separador.



$$h_2 = h_g \text{ a la presión de separación de alta}$$

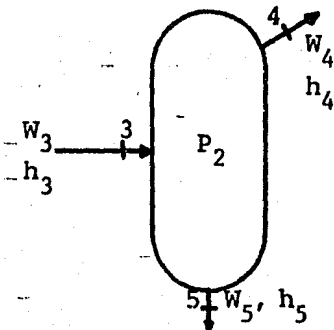
$$h_3 = h_f \text{ a la presión de separación de alta}$$

$$x = \frac{h_1 - h_f}{h_g - h_f}$$

$$W_2 = W_1 x$$

$$W_3 = W_1 (1 - x)$$

- Proceso en el evaporador.



$$h_4 = h_g \text{ a la presión de separación de baja}$$

$$h_5 = h_f \text{ a la presión de separación de baja}$$

Realizando un balance de materia y energía:

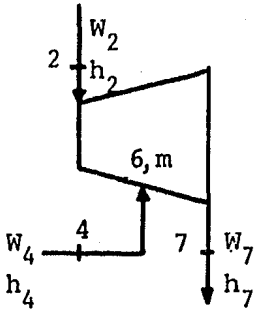
$$W_3 = W_4 + W_5$$

$$W_3 h_3 = W_4 h_4 + W_5 h_5$$

$$W_4 = W_3 \left( 1 - \frac{h_3 - h_4}{h_5 - h_4} \right)$$

$$W_5 = W_3 \left( \frac{h_3 - h_4}{h_5 - h_4} \right)$$

- Proceso en la turbina de presión mixta.



Proceso del punto (2) al punto (6), considerando una expansión isoentrópica:

$$s_2 = s_{6s} = s_{f6s} + x s_{fg6s}$$

Donde:

$s_{f6s}$  y  $s_{fg6s}$  a la presión de separación intermedia.

$$x = \frac{s_2 - s_f}{s_{fg}}$$

Por lo tanto:

$$h_{6s} = h_{f6s} + x h_{fg6s} \text{ a la presión de separación intermedia}$$

Considerando la eficiencia interna:

$$\eta_I = \frac{h_2 - h_{6R}}{h_2 - h_{6s}}$$

En este punto (6) se produce una mezcla entre el vapor que se ha expandido parcialmente en la turbina y el vapor producido por la evaporación.

Realizando un balance de materia y energía para encontrar las condiciones de la mezcla, se tiene:

$$W_m = W_2 + W_4$$

$$W_m h_m = W_2 h_{6R} + W_4 h_4$$

$$h_m = \frac{W_2 h_{6R} + W_4 h_4}{W_2 + W_4}$$

Como:

$$h_m = h_f + x h_{fg} \text{ a la presión de separación intermedia}$$

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

Finalmente:

$$s_m = s_f + x s_{fg} \text{ a la presión de separación intermedia}$$

Proceso del punto (m) al punto (7), considerando expansión isoentrópica en la



turbina:

$$s_m = s_{7s} = s_{f7s} + xs_{fg7s} \quad \text{a la presión del condensador}$$

$$x = \frac{s_m - s_{f7s}}{s_{fg7s}}$$

Por lo tanto:

$$h_{7s} = h_{f7s} + xh_{fg7s} \quad \text{a la presión del condensador}$$

Considerando la eficiencia interna:

$$\eta_I = \frac{h_m - h_{7R}}{h_m - h_{7s}}$$

$$h_{7R} = h_m - \eta_I (h_m - h_{7s})$$

Potencia Eléctrica Generada:

$$\text{Primera etapa} \quad \text{Pot}_1 = W_2 (h_2 - h_{6R})$$

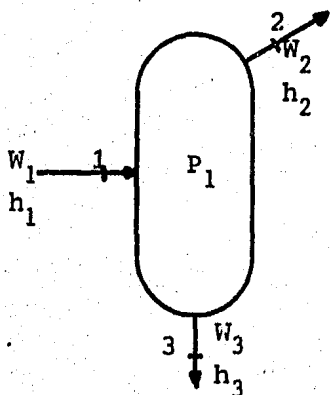
$$\text{Segunda etapa} \quad \text{Pot}_2 = (W_2 + W_4) (h_m - h_{7R})$$

$$\text{Pot} = (\text{Pot}_1 + \text{Pot}_2) \times 1/3600 \times \eta_m \times \eta_g$$

En la figura 2.2 se muestra el balance térmico del ciclo con dos etapas de separación.

### Ciclo con tres Etapas de Separación.

- Proceso en el separador.



$$h_2 = h_g \quad \text{a la presión de separación}$$

$$h_3 = h_f \quad \text{a la presión de separación}$$

$$x = \frac{h_1 - h_f}{h_g - h_f}$$

$$W_2 = W_1 x$$

$$W_3 = W_1 (1 - x)$$

- Proceso en la turbina " A ".

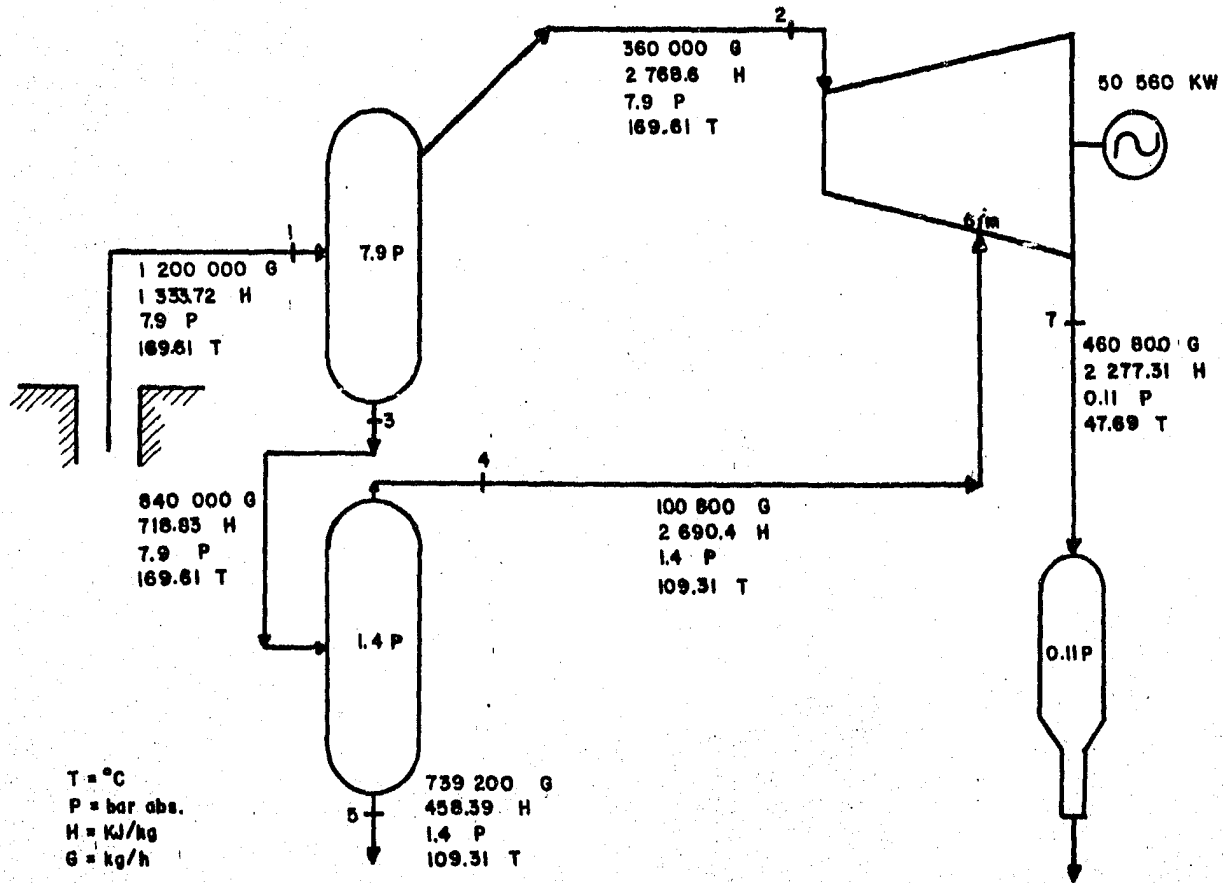


Fig. 2.2 Balance Térmico con dos Etapas de Separación y Turbina de Presión Mixta.

$$s_2 = s_{3s} = s_{f3s} + x s_{fg3s}$$

a la presión del condensador

$$x = \frac{s_2 - s_{fg3s}}{s_{fg3s}}$$

$$h_{3s} = h_{f3s} + x h_{fg3s}$$

a la presión del condensador

Considerando la eficiencia interna:

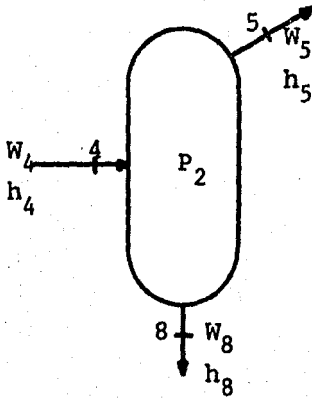
$$\eta_I = \frac{h_2 - h_{3R}}{h_2 - h_{3s}}$$

$$h_{3R} = h_2 - \eta_I (h_2 - h_{3s})$$

Potencia Eléctrica Generada por la Turbina " A " .

$$Pot_A = W_2 (h_2 - h_{3R}) \times 1/3600 \times \eta_m \times \eta_g$$

- Proceso en el primer evaporador.



$$h_5 = h_g \quad \text{a la presión de separación}$$

$$h_8 = h_f \quad \text{a la presión de separación}$$

Realizando un balance de materia y energía:

$$W_4 = W_5 + W_8$$

$$W_4 h_4 = W_5 h_5 + W_8 h_8$$

Por lo tanto:

$$W_5 = W_4 \frac{h_4 - h_8}{h_5 - h_8}$$

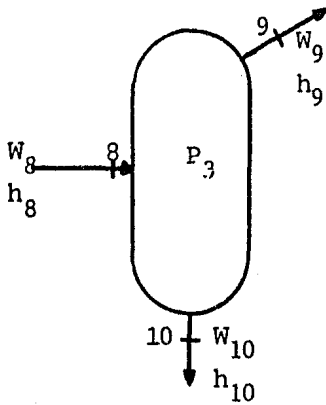
$$W_8 = W_4 \left( 1 - \frac{h_4 - h_8}{h_5 - h_8} \right)$$

- Proceso en el segundo evaporador.

$$h_9 = h_g \quad \text{a la presión de separación}$$

$$h_{10} = h_f \quad \text{a la presión de separación}$$

Realizando un balance de materia y energía:



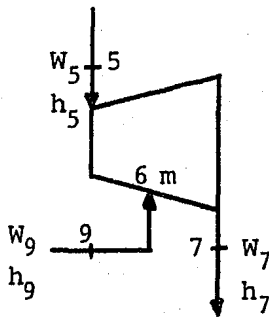
$$W_8 = W_9 + W_{10}$$

$$W_8 h_8 = W_9 h_9 + W_{10} h_{10}$$

$$W_9 = W_8 \left( \frac{h_8 - h_{10}}{h_9 - h_{10}} \right)$$

$$W_{10} = W_8 \left( 1 - \frac{h_8 - h_{10}}{h_9 - h_{10}} \right)$$

- Proceso en la turbina " B " .



Proceso del punto (5) al punto (9), considerando una expansión isoentrópica:

$s_{6s} = s_5 = s_{f6s} + x s_{fg6s}$  a la presión de separación.

$$x = \frac{s_5 - s_{f6s}}{s_{fg6s}}$$

$h_{6s} = h_{f6s} + x h_{fg6s}$  a la presión del condensador.

Considerando la eficiencia interna:

$$\eta_I = \frac{h_5 - h_{6R}}{h_5 - h_{6s}}$$

$$h_{6R} = h_5 - \eta_I (h_5 - h_{6s})$$

En este punto (6) se produce la mezcla entre el vapor parcialmente expandido y el proveniente de la segunda separación.

Realizando un balance de materia y energía para encontrar las condiciones de mezcla, se tiene:

$$W_m = W_5 + W_9$$

$$W_m h_m = W_5 h_{6R} + W_9 h_9$$

$$h_m = \frac{W_5 h_{6R} + W_9 h_9}{W_5 + W_9}$$

Como:

$$h_m = h_f + x_m h_{fg} \quad \text{a la presión de separación}$$

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

Finalmente:

$$s_m = s_f + x_m s_{fg} \quad \text{a la presión de separación}$$

- Proceso en la turbina " B " ( Del punto (m) al punto (7) ).

Considerando una expansión isentrópica del punto (m) al punto (7):

$$s_m = s_{7s} = s_{f7s} + x s_{fg7s} \quad \text{a la presión del condensador}$$

$$x = \frac{s_m - s_f}{s_{fg}}$$

$$h_{7s} = h_{f7s} + x h_{fg7s} \quad \text{a la presión del condensador}$$

Considerando la eficiencia interna:

$$\eta_I = \frac{h_m - h_{7R}}{h_m - h_{7s}}$$

$$h_{7R} = h_m - \eta_I ( h_m - h_{7s} )$$

Potencia Eléctrica Generada por la Turbina " B ".

$$\text{Primera Etapa} \quad \text{Pot}_1 = W_5 ( h_5 - h_{6R} )$$

$$\text{Segunda Etapa} \quad \text{Pot}_2 = ( W_5 + W_9 ) ( h_m - h_{7R} )$$

$$\text{Pot}_B = ( \text{Pot}_1 + \text{Pot}_2 ) \times 1/3600 \times \eta_m \times \eta_g$$

Potencia Eléctrica Total del Sistema.

$$\text{Pot} = \text{Pot}_A + \text{Pot}_B$$

En la figura 2.3 se muestra el balance térmico del ciclo con tres etapas de separación.

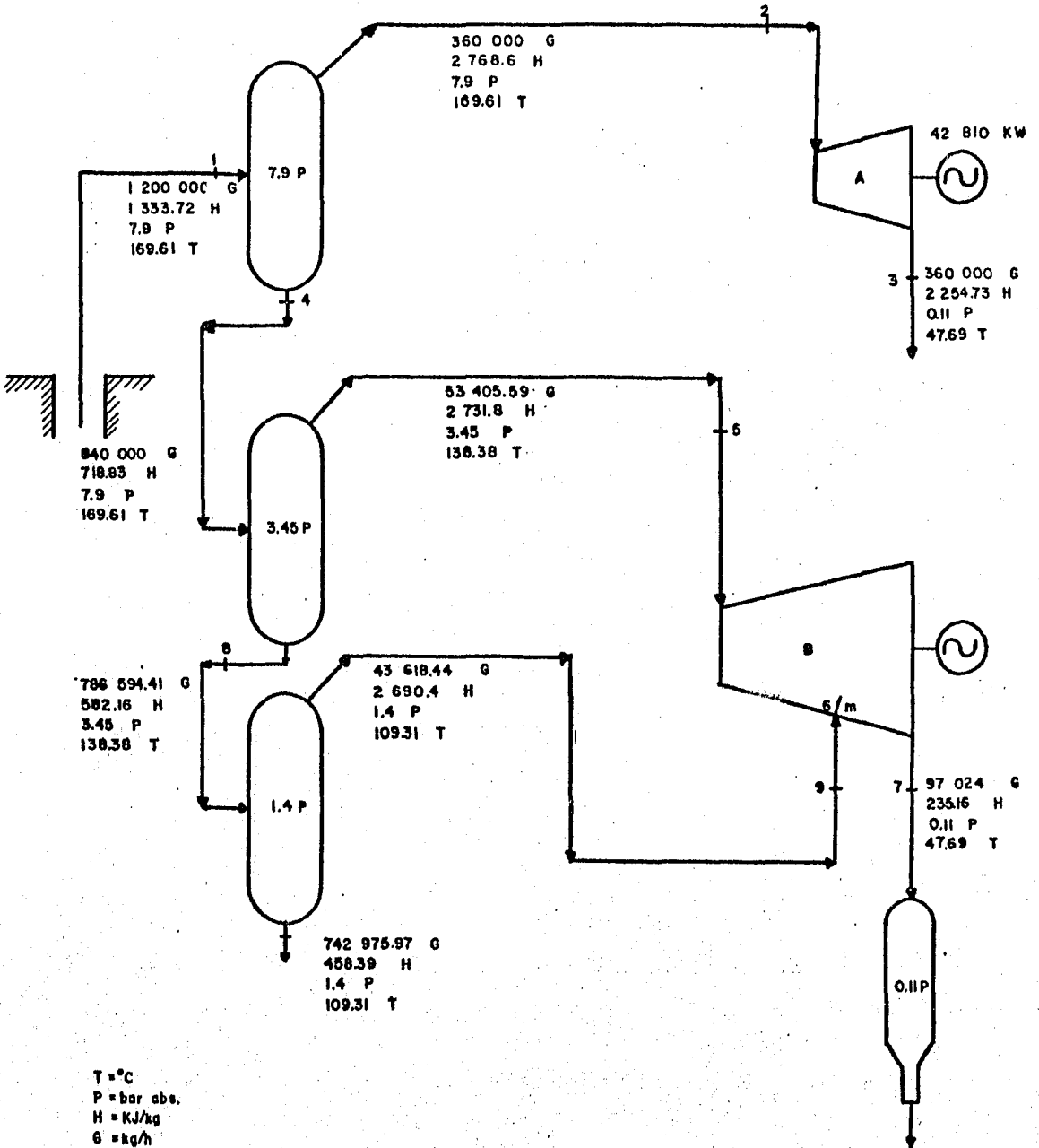


Fig. 2.3 Balance Térmico con tres Etapas de Separación y dos Turbinas.

En la tabla 2.1 se presentan los resultados de la generación eléctrica e incremento de generación para cada una de las alternativas analizadas.

ALTERNATIVA	GENERACION ( MW )	APROVECHAMIENTO DEL RECURSO GEOTERMICO ( % )	INCREMENTO DE GENERACION ( % )
Una etapa de separación	42.81	9.63	Base
Dos etapas de separación	50.56	11.37	18.10
Tres etapas de separación	50.93	11.46	18.96

Tabla 2.1

Se observa que el mayor incremento en generación eléctrica ocurre al aumentar de una a dos etapas de separación ( 18.10% ); ésto duplicando el equipo de superficie, pero al aumentar de dos a tres etapas de separación el incremento en generación es mucho menor ( 4.75% ); ésto triplicando el equipo de superficie.

Aunque éste es un análisis termodinámico únicamente, ayuda a comprender el aumento en complejidad del sistema al incrementar el número de etapas de evaporación-separación.

Debido a los resultados obtenidos del análisis del comportamiento de los ciclos presentados anteriormente, en el siguiente inciso se estudiarán los equipos principales de una planta geotermoeléctrica, poniendo especial énfasis en el equipo utilizado en un ciclo con dos etapas de separación, el cual se considera el más recomendable para las condiciones analizadas.

## 2.2 EQUIPOS PRINCIPALES.

El aprovechamiento geotérmico está constituido por un conjunto de elementos cuya interacción determina el rendimiento que de él pueda esperarse. Para comprender como interactúan los elementos se necesita primero entender cuales son ellos y como funcionan. En términos generales puede decirse que son tres: el yacimiento, el equipo de superficie y los pozos que ligan a uno y otro.

El yacimiento se explica muy ampliamente en el Capítulo 1 y el comportamiento de los pozos se estudiará en una forma más completa en el Capítulo 3.

El equipo de superficie está formado por la turbina y sus accesorios así como por todos los dispositivos que llevan hasta la turbina el fluido geotérmico. Entre estos dispositivos se encuentran los separadores, los silenciadores, las válvulas, las tuberías y el condensador.

En esta parte del capítulo se hace una breve descripción del separador y se mencionan las diferencias más importantes de la turbina y el condensador con respecto a los diseños convencionales empleados en una planta termoeléctrica.

### Separadores.

Frecuentemente es necesario separar los componentes de una mezcla en fracciones individuales. Estas fracciones pueden diferir unas de otras por el tamaño de partícula, por su estado de fase o por su composición química.

Todos los procedimientos para separar los componentes de mezclas caen dentro de dos grandes clases: las llamadas separaciones mecánicas y las separaciones que incluyen métodos que dependen de los cambios de fase como evaporación y condensación.

Las separaciones mecánicas se aplican a mezclas heterogéneas bien definidas con partículas mayores a 1/10 de micra; es decir, que son propias de las suspensiones y no de las soluciones que son mezclas homogéneas. Tampoco es usual que se utilicen para el estado coloidal siendo la región intermedia entre so-



lución y suspensión.

Son aplicables para separar líquidos de líquidos, sólidos de gases, líquidos de gases, sólidos de sólidos y sólidos de líquidos. Sus técnicas se basan en las diferencias físicas que existen entre las partículas tales como tamaño, forma, densidad, características eléctricas y magnéticas.

En general se utilizan muchos métodos para lograr la separación, pero debe saberse escoger el apropiado para cada problema en particular.

En este caso, se enfocará el estudio a los mecanismos de separación líquido de gas, ya que el fluido geotérmico está dentro de este grupo.

- Mecanismos de Separación Líquido de Gas.

El diseño del equipo para la separación de partículas líquidas de gases es, a menudo, similar al diseño de colectores de polvo o separadores de partículas sólidas de gases.

Es importante conocer las características de la mezcla así como el tamaño de gota dispersa, para lograr un buen diseño, selección u operación de un equipo de separación.

Una clasificación de partículas junto con el equipo de separación usual para cada tamaño de la misma se puede ver en la figura 2.4.

Generalmente las dispersiones de líquido en gas encontrados en procesos industriales, constituyen pequeñas gotitas dispersas con diámetros en un rango de 0.1 a 5000 micras que de acuerdo a la clasificación de mezclas, entra en las denominadas suspensiones y más propiamente como rocío.

Los principios que hacen posible la separación de las partículas líquidas del gas, se pueden identificar de la siguiente forma:

1) Fuerza de Gravedad. Los primeros equipos de separación se fundamentan en

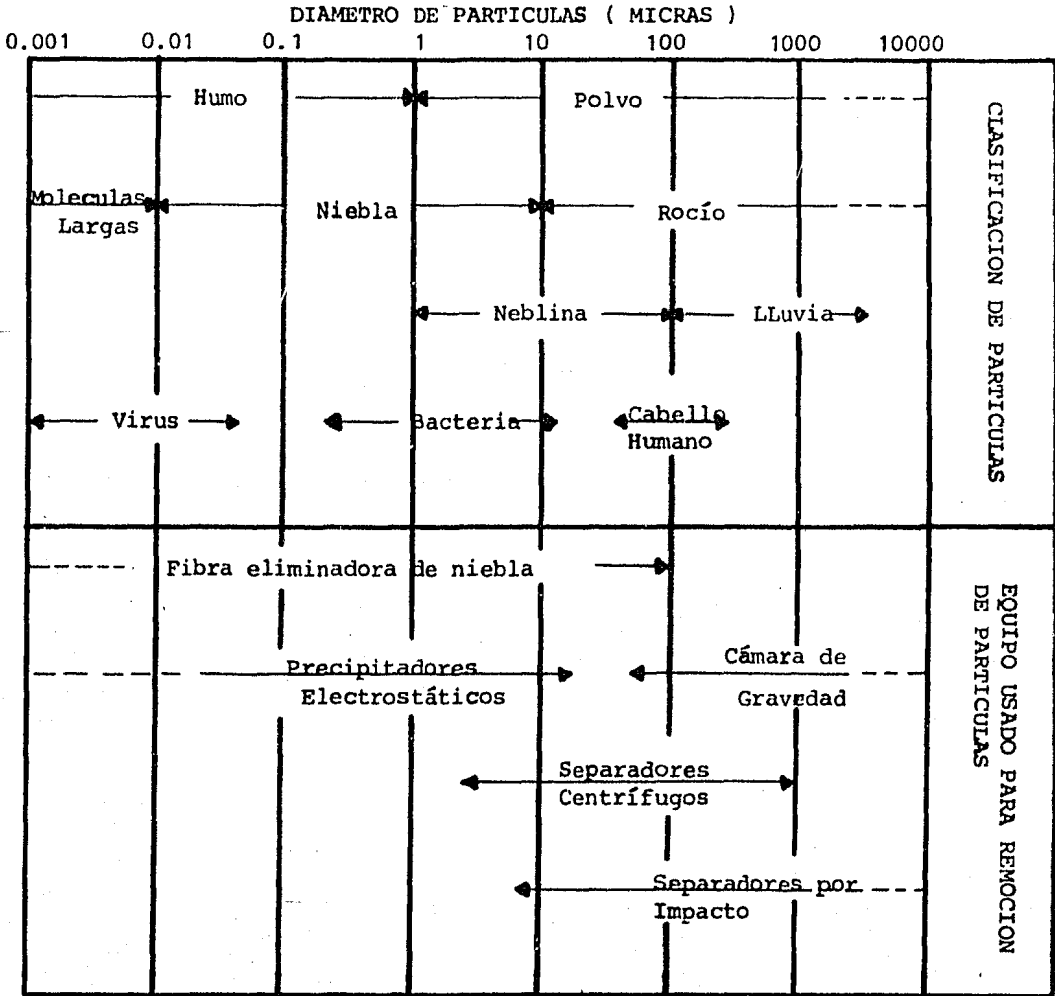


Fig. 2.4 Clasificación de partículas y equipo de separación.

este solo principio el cual requiere reducir la velocidad del gas fluyendo horizontalmente a través de una cámara para dejar expuestas las partículas de líquido a la acción de la gravedad y lograr la separación al depositarse las partículas líquidas en el fondo de la cámara.

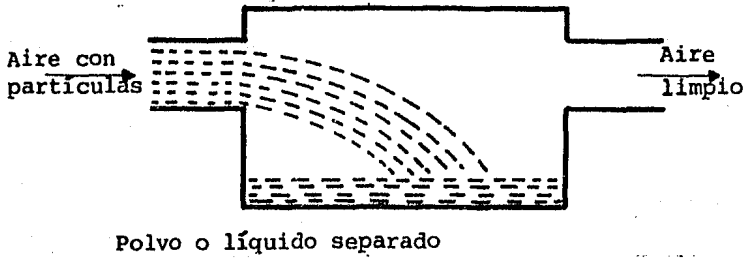


Fig. 2.5 Separación por gravedad.

2) Fuerza Centrífuga. Esta técnica es utilizada por los separadores llamados ciclónicos tanto para separar líquido como partículas sólidas de corrientes de gas.

Cuando los separadores ciclónicos se utilizan en la separación de líquido, se tiene la ventaja de que una vez adheridas las gotas a las paredes del equipo, éstas no son arrastradas nuevamente por la corriente, cosa que es inevitable aunque sea en pequeños porcentajes, cuando se manejan partículas sólidas.

Aunque son varios los diseños de separadores ciclónicos, básicamente consisten de un depósito cilíndrico vertical con una entrada de mezcla tangencial o en espiral, haciendo que las partículas de mayor densidad se adhieran a las paredes del separador por la fuerza centrífuga formando una película de líquido, la cual desciende en espiral por efecto de la gravedad mientras que el vapor o gas, por su baja densidad, se conserva en la parte interior.

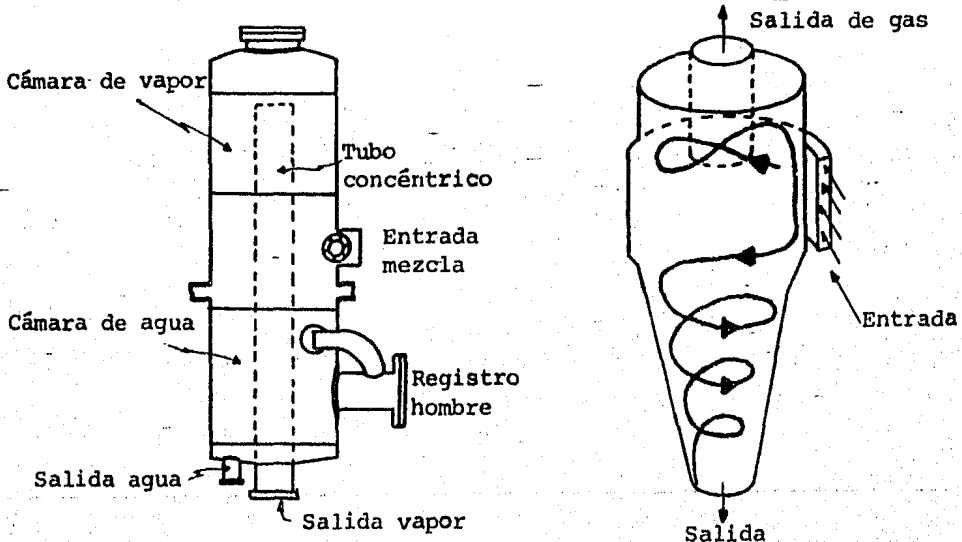


Fig. 2.6 Separadores ciclónicos.

3) Movimiento Browniano. Este es el principio primordial en que se fundamenta un eliminador de niebla o neblina, el cual tiene una alta eficiencia de separación de partículas hasta con un diámetro de 3 micras. Esta eficiencia puede ser tan alta como de 99.98%.

Un separador de este tipo se puede entender en la figura 2.7.

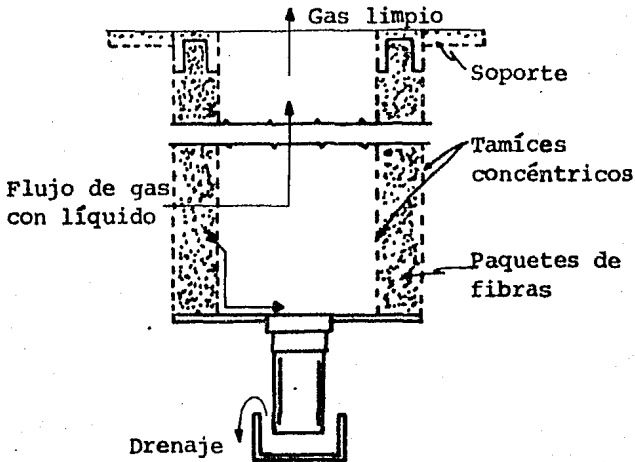


Fig. 2.7 Eliminador de niebla.

La construcción de este separador consiste en paquetes de fibras retenidos entre dos mallas concéntricas. Al paso del flujo de gas, las pequeñas gotas de líquido son colectadas en la primera superficie de las fibras, formando una delgada película que humedece la fibra; después este líquido es movido horizontalmente por arrastre del gas hasta salir del otro lado para caer finalmente al fondo del eliminador por efecto de la gravedad. A este desplazamiento de partículas entre el gas y el líquido se conoce como Movimiento Browniano <sup>(1)</sup>.

4) Precipitación Electroestática. Se pueden utilizar precipitadores electrostáticos para remover partículas sólidas y líquidas de gases.

(1) Robert H. Perry. Chemical Engineers Handbook. p. 18.88.

Cualquier partícula cargada con electricidad estática es atraída por un electrodo que conduce una carga de signo opuesto a la de la partícula. Así una partícula de carga negativa es atraída por un electrodo positivo y viceversa.

Este es el hecho en que se fundamentan todos los métodos de separación electrostática los cuales deben cargar las partículas con electricidad estática para poder operar.

Los separadores de este tipo requieren de mantenimiento continuo para conservar su eficiencia y potenciales de varios miles de volts con el fin de que las cargas sean suficientemente grandes para obtener una adecuada fuerza de atracción.

5) Aglomeración Sónica. La aglomeración de partículas líquidas movidas por vibraciones sónicas es tan sólo un mecanismo propuesto ya que no es utilizable en operaciones comerciales.

Las vibraciones pueden ser originadas por una varilla, plancha vibradora o por una corriente pulzante de gas. Se requiere de un campo mínimo de intensidad de 150 decibeles para lograr suficiente movimiento de partículas y posteriormente su aglomeración.

6) Impacto. Este principio consiste en colocar una obstrucción sólida a la corriente de gas para interferir el flujo, ocasionando que las partículas suspendidas choquen con dicha obstrucción; de esta manera las partículas quedan adheridas para ser removidas subsecuentemente.

El principio de esta separación se ilustra en la figura 2.8.

Las partículas que inicialmente se movían a lo largo de las líneas de corriente entre A y B golpean el sólido y pueden ser removidas si se adhieren a él. Las partículas fuera de las líneas A y B no golpean el sólido y por lo tanto continúan en suspensión.

También es frecuente que este mecanismo de choque de partículas se encuentre

dentro de un separador del tipo ciclónico.

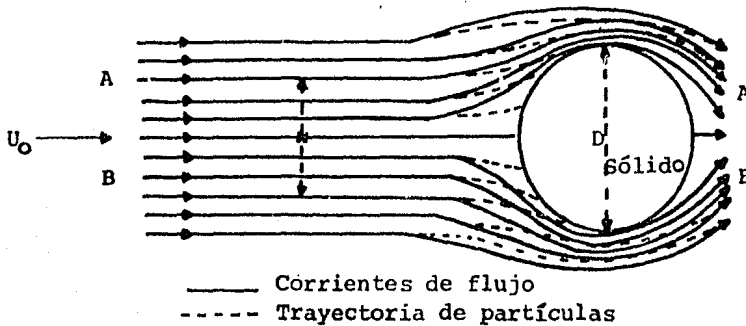


Fig. 2.8 Mecanismo de separación por impacto.

#### Tipos de Separadores Empleados en Geotermia.

Desde la instalación y operación de la primera planta geotermoeléctrica en el campo geotérmico de Wairakei, Nueva Zelanda, en 1958, las instalaciones superficiales han evolucionado integrando las experiencias de operación.

A continuación se mencionan tres tipos de separadores, los cuales han sido empleados en diferentes campos geotérmicos.

##### 1) Separador Tipo " U " de 180°.

Es el primer tipo de separador empleado en un campo húmedo y consiste de una curva con ramificación inclinada por donde es guiado el vapor ( Ver figura 2.9 ).

La mezcla agua-vapor, al pasar por la curva de 180°, se somete a una fuerza centrífuga muy alta por lo que arroja el agua a la pared exterior; así que ( teóricamente ) sólo el vapor seco va por la pared interior de donde es descargado.

Para el caso de Wairakei se observó que si la velocidad media del agua es de

20 m/s y se tiene un radio de curvatura de 50 cm, la aceleración del agua lograría un valor de 80g aproximadamente. Bajo tales condiciones se esperaría que toda el agua se adheriese a la pared exterior y obtener una alta calidad del vapor separado, pero debido a la turbulencia, el equipo removerá del 80 al 90% del agua.

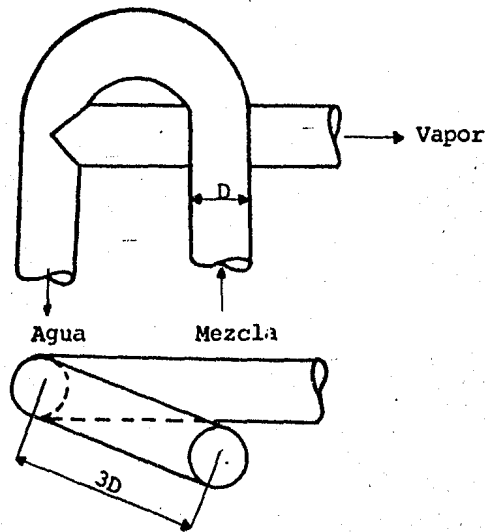


Fig. 2.9 Separador tipo " U ".

Este tipo de separadores son baratos y simples de reparar cuando la arena y partículas de roca ocasionan un desgaste en la curva de dicho separador. Otro uso que se les dió a estos separadores fue el de colocarlos antes de un separador ciclónico con el fin de reducir la carga de este último.

## 2) Separador Tipo Horizontal.

Generalmente estos separadores son utilizados para evaporar el agua saturada que proviene de una primera separación.

Las características del separador que se probó en el campo de Cerro Prieto, Baja California Norte, son las siguientes: Aproximadamente a tres cuartos de la altura total del separador, se localizan dos entradas por donde se intro-

duce el flujo que proviene del agua separada. En el fondo, hacia la parte central, se encuentra la salida de agua remanente. Diametralmente opuesta se haya la salida del vapor separado.

En cuanto a descripción exterior cabe mencionar la existencia de tres registros. Dos de ellos se encuentran debajo de las entradas; se utilizan para revisar la continuación de las mismas en el interior. El otro registro se localiza en una de las cabezas y es un registro hombre.

En su interior, las entradas de agua tienen una trayectoria curva hacia abajo con un ángulo de  $135^{\circ}$  que hace que el agua evaporada sea separada por el efecto de la fuerza centrífuga y tenga un movimiento hacia arriba.

En la figura 2.10 se muestra un esquema de este tipo de separador.

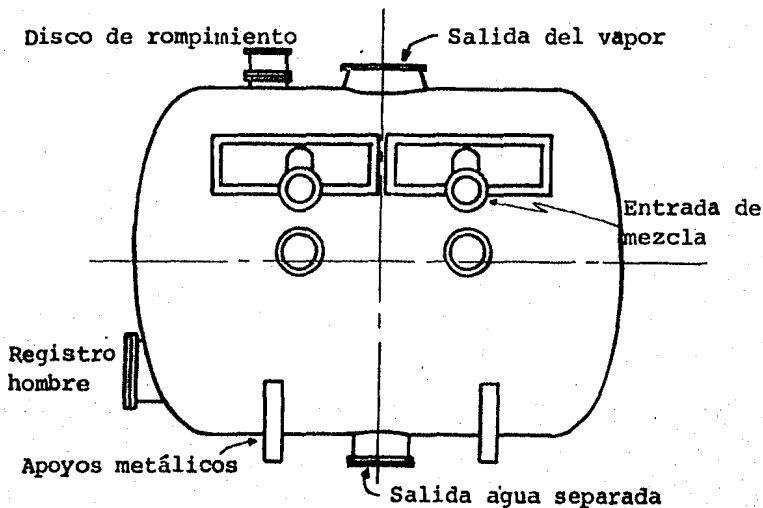


Fig. 2.10 Separador tipo horizontal.

### 3) Separador Tipo Webre.

Este separador está formado por dos cilindros concéntricos; el cilindro interior se comunica por su parte superior al cilindro exterior y por abajo está



ligado a la tubería que conducirá el vapor. El cilindro exterior está cerrado en sus dos extremos. Por una tubería horizontal y de tipo espiral, la mezcla que ingresa al cilindro exterior adquiere una fuerte velocidad tangencial lo que origina que las gotas de agua sean lanzadas contra la pared, precipitándose hacia el fondo por la acción de la gravedad. ( Ver figura 2.11 ).

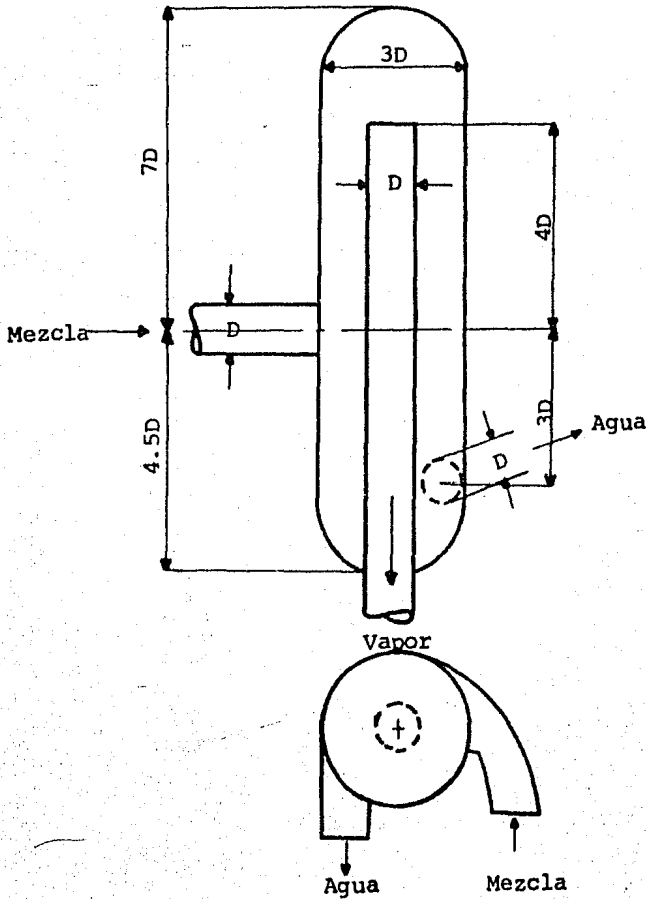


Fig. 2.11 Separador tipo Webre.

El agua capturada en la parte baja del cilindro exterior sale por otra tubería tangencial, en cambio el vapor asciende con movimiento helicoidal y velo-

cidad tangencial cada vez menor, hasta la parte superior del cilindro exterior; allí penetra el cilindro interior y fluye hacia la tubería de vapor.

El separador debe considerarse un tanque acumulador de agua, el cual, puede ser integrado o no al equipo. Este tanque tiene como objetivo el de servir como amortiguamiento y dar una mayor estabilidad a la operación del separador al existir cambios en el flujo de mezcla de alimentación. Además, este tanque forma un sello de agua que impide pérdidas de vapor y ayuda a lograr un control estable en el nivel de agua.

#### 4) Secador Tipo Webre.

Este equipo servirá para eliminar, del vapor, la humedad arrastrada desde los separadores y el condensado que se forme a lo largo de la tubería. El secador cuenta con dos salidas de agua. Estas líneas son de igual diámetro pero tienen diferente uso. Una de ellas es utilizada con un orificio en su extremo, el cual actúa como purga, en lugar de trampas de vapor ya que estas últimas se incrustan. La otra línea, tiene una válvula la cual actúa al existir un nivel alto en el secador.

El secador tipo Webre tiene las mismas características que el separador tipo Webre descrito en el inciso anterior, excepto que este secador no tiene integrado el tanque de agua.

Los objetivos principales de este equipo son:

a) Garantizar que la calidad del vapor separado sea, cuando menos, la requerida por la turbina aún en la eventual falla de un pozo, es decir, cuando la mezcla de un pozo llegue al equipo.

b) Tener una caída de presión mínima.

Características de los Separadores Utilizados en las Plantas Geotermoeléctricas.

Los campos geotérmicos de " líquido dominante ", como es el caso de Cerro Prieto, han optado por emplear el separador tipo Webre tanto para la separación a pie de pozo como en separadores secundarios, terciarios, etc.

Las principales razones que explican el éxito de este equipo son:

- a) Simplicidad ( no tiene partes internas móviles que se puedan corroer, dañar o erosionar ).
- b) Facilidad de operación y mantenimiento.
- c) Muy económicos.
- d) Se ha utilizado con muy buenos resultados en varios campos geotérmicos.

El diseño de este separador está basado en la velocidad de vapor entrando al equipo y en las relaciones geométricas encontradas experimentalmente por P. Bangma<sup>(1)</sup> las cuales están expresadas en función del diámetro de la tubería de entrada al separador. Esto se estudiará más a fondo en el Capítulo 4.

Los principales parámetros que se deben tomar en cuenta para el diseño de este tipo de separadores son:

- 1) La relación entre la cantidad de vapor y líquido a ser separada. Cuando esta relación es grande ( mezcla con baja calidad ) el separador trabaja más eficientemente.
- 2) El diámetro de gota a separar es un factor importantísimo ya que este parámetro domina la eficiencia del separador. Si se tienen grandes diámetros de

---

(1) P. Bangma. " The Development and Performance of a Steam-Water Separator for use on Geothermal Bores ". Rome 1961.

partículas, se tendrán equipos pequeños y viceversa. Si las gotas son demasiado pequeñas, el separador centrífugo no podrá separarlas.

3) La velocidad del vapor de entrada al equipo es otro factor importante con el cual se puede caracterizar el comportamiento del equipo. A velocidades extremadamente bajas ( 0 a 10 m/s ) la calidad del vapor separado es mala ya que la fuerza centrífuga es baja y el separador actúa como gravitacional.

Al incrementarse esta velocidad, la calidad mejora hasta llegar a velocidades muy altas donde la calidad se empieza a deteriorar rápidamente.

4) La velocidad de ascenso del vapor dentro del equipo es un factor importante de caracterización del arrastre. A bajas velocidades existe poco arrastre o es nulo mientras que a valores altos, el arrastre puede ser excesivo.

5) Al efectuar el diseño del separador, es necesario determinar el diámetro de la tubería de entrada al equipo a través de la velocidad. Este diámetro puede ser reducido considerablemente si se selecciona una velocidad alta ( 25 a 40 m/s ) lo cual es muy favorable en muchos aspectos tales como separadores más pequeños, reducción de costos, etc., pero también desfavorable al tener diámetros de gota más pequeños, reducir la eficiencia del separador, incrementar la corrosión y erosión, etc., por lo que en cualquier diseño deberán considerarse todos estos parámetros. La filosofía debe ser la de tener el equipo más pequeño con la calidad requerida sin perder de vista las facilidades para el mantenimiento del equipo.

Con respecto a los materiales que son utilizados en la construcción de este tipo de separadores se recomienda el acero ASTM A-285 Gr C o el ASTM A-515 Gr 70 para la placa del recipiente y placa de la entrada de la mezcla, y acero ASTM A-53 Gr B sin costura para la tubería que se usa en la entrada de mezcla y salida de agua y vapor. Para el diseño de espesores deberá tomarse en cuenta la tolerancia por corrosión y erosión.

Un buen diseño de los separadores y evaporadores, evita problemas de incrustación en los vaporductos y turbina aumentando la eficiencia del ciclo y la

vida útil de la planta.

### Turbinas.

Una turbina de vapor es una máquina que convierte la energía del vapor en trabajo mecánico. Para entregar dicha energía, el vapor se expande de alta a muy baja presión, siendo la diferencial de presión y la temperatura inicial las que determinan la energía que teóricamente está disponible.

Las turbinas de vapor pueden tener muchas formas, pero básicamente están constituidas por un rotor dentro de una carcasa de acero, en donde la energía del vapor se convierte en trabajo mecánico al mover los álabes del rotor de la turbina.

Para lograr que la turbina tenga un buen funcionamiento, se necesita que el vapor suministrado esté libre de humedad o de otras impurezas y su temperatura se mantenga tan uniforme como sea posible. Para una operación adecuada tanto la presión como la temperatura deberán conservarse en los valores de diseño.

El diseño de la turbina para vapor geotérmico ( bajas presiones ) difiere en algunas áreas del diseño de turbinas convencionales ( altas presiones y temperaturas ). Las principales áreas de diferencia son las siguientes:

#### a) Arreglo de la Turbina.

Este tipo de turbina por lo general es de doble flujo, de presión simple o doble con uno o dos cuerpos, teniéndose los arreglos y sus rangos de aplicación en la figura 2.12.

Los materiales empleados en este tipo de turbinas dependen del tipo de diseño, medio ambiente de operación y consideraciones económicas. Los requerimientos de diseño están relacionados a importantes propiedades del material tales como resistencia, fatiga, etc. La erosión y corrosión constituyen los mayores efectos del medio; mientras que los factores económicos involucran costo,

disponibilidad y productividad de los componentes.

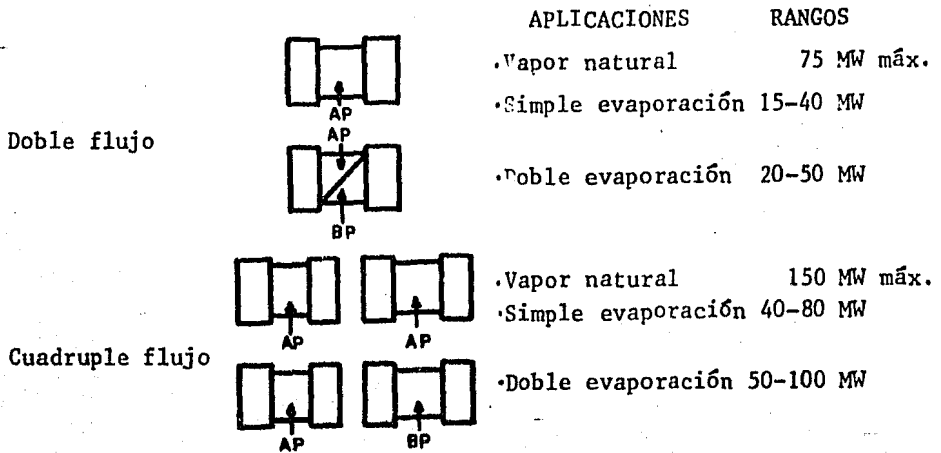


Fig. 2.12 Arreglos en turbinas geotérmicas.

Todo lo anterior es en contraste con las aplicaciones convencionales de los combustibles fósiles no recalentados, cuyas turbinas son diseñadas utilizando aceros resistentes a la alta presión y son fabricadas con carcasa de simple o doble flujo de escape.

#### b) Trayectoria del Vapor.

La trayectoria del vapor es diseñada con una mayor protección contra la corrosión y erosión que en las unidades convencionales. Con el vapor saturado que se tiene en la admisión de la turbina, los separadores de humedad son necesarios en todas las etapas para aumentar la extracción y canalización de la humedad de la máquina. Esto minimiza la erosión en la trayectoria del vapor. Los álabes del rotor deben estar protegidos contra los daños de la erosión por medio del endurecimiento por flama o por un recubrimiento de estelita en el borde de entrada.

Los daños causados por la erosión y corrosión son más pronunciados en las superficies de las juntas, en las cuales hay diferencias de presiones. El daño

es controlado en tales áreas con el uso de materiales inoxidables. Cada etapa de la trayectoria del vapor es drenada a través de orificios de acero inoxidable.

Los empaques son construidos con material " níquel-resistente ". Estas aleaciones de hierro han demostrado su resistencia a la erosión y corrosión en un ambiente donde tales efectos son significativos. Esto incluye aplicaciones geotérmicas, nucleares e industriales. Los materiales de " níquel-resistente " son requeridos especialmente donde las aleaciones a base de cobre tienen problemas, como en el vapor geotérmico.

El rotor, que es el elemento que tiene mayor contacto con la trayectoria del vapor, es de construcción sólida. Las aleaciones utilizadas proporcionan la cantidad necesaria de resistencia a la fractura y máxima resistencia a la corrosión y erosión.

Pruebas de ultrasonido altamente sensibles y procedimientos de fracturas mecánicas son usadas para verificar la integridad del rotor.

#### c) Diseño de la Carcasa.

El diseño de la carcasa, en el caso de una turbina de presión mixta, comprende: dos descargas, los diafragmas, una entrada de alta presión, dos entradas de baja presión ( para obtener así un balance de empuje ) y drenes por cada etapa; lo cual se muestra en la figura 2.13.

La construcción de la carcasa está compuesta por la integración de un cuerpo interno con un externo, esto tiene como resultado el mejoramiento de la operación como del mantenimiento de la máquina. Las canaletas de los diafragmas se encuentran integrados a la carcasa y estos sirven para la protección contra las sobrepresiones. Estos diafragmas de alivio son construidos con materiales de aleación de aluminio en vez de aleaciones de cobre.

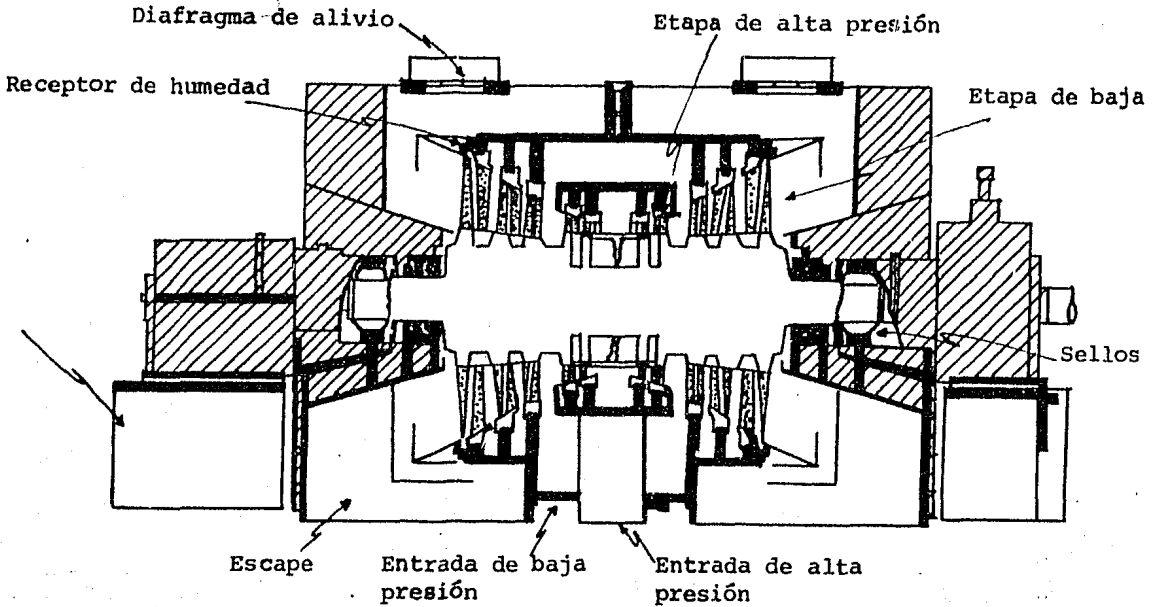


Fig. 2.13 Turbina de presión mixta.

### Condensador.

El tipo de condensador depende de alguna forma del uso que se le vaya a dar al condensado. El condensador de superficie se emplea comúnmente en las modernas plantas termoeléctricas. Esto se debe a la necesidad de recobrar el condensado para reutilizarlo en el ciclo, de este modo la misma agua puede ser empleada una y otra vez y el sistema agua-vapor se puede mantener limpio. Estos condensadores son del tipo de tubos y coraza, y casi sin excepción, el vapor u otro fluido de trabajo está dentro de la coraza y el refrigerante circula dentro de los tubos.

Por otro lado, en el condensador de contacto directo o mezcla la condensación ocurre por el contacto directo del fluido de trabajo con el refrigerante. El refrigerante es introducido al condensador formando un rocío que se mezcla con el vapor, absorbiendo el calor latente. Este tipo de condensadores re-



quieren de poco mantenimiento, ya que no existen superficies de transmisión de calor que puedan incrustarse.

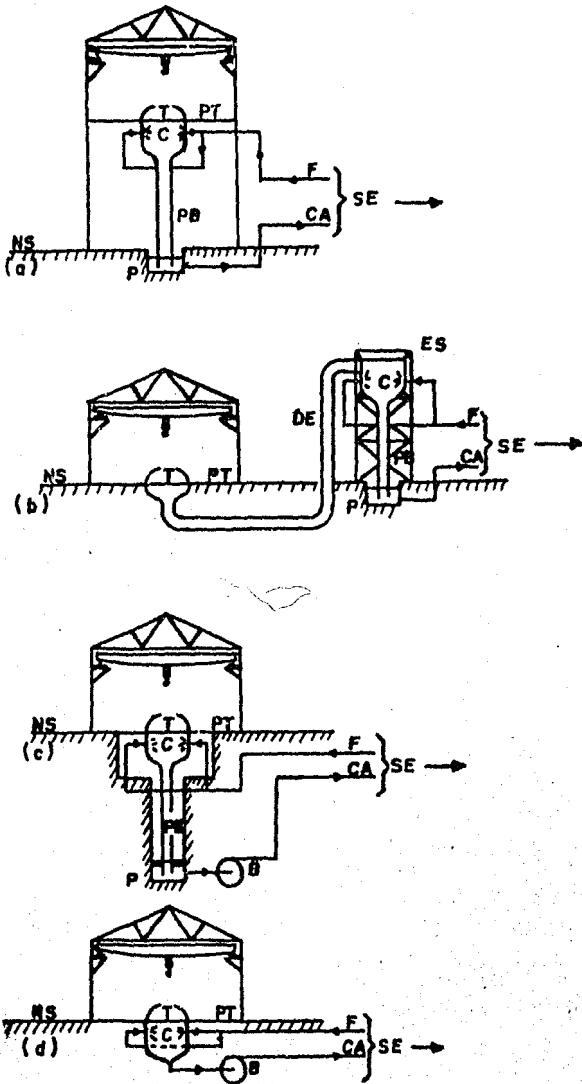
Como se explicó en el Capítulo 1, en un ciclo geotérmico no existe un generador de vapor, lo que elimina la necesidad de recuperar el condensado. En esto radica la principal razón para utilizar condensadores de contacto directo en un ciclo geotérmico.

En plantas geotermoeléctricas hay varios posibles arreglos de la turbina y el condensador, los cuales se muestran en la figura 2.14 y se explican a continuación.

El arreglo ( a ) es usado en Wairakei, tiene la ventaja de fácil accesibilidad, pero la desventaja de la gran altura de la construcción. El arreglo ( b ) es el más ampliamente utilizado y se tiene en los campos geotérmicos de Los Geysers ( E.E.U.U. ), Onuma ( Japón ), Cerro Prieto ( México ) y en la Unión Soviética. Este arreglo tiene menores costos de construcción en la casa de máquinas con la turbina instalada a nivel de piso, teniendo la desventaja de una alta estructura externa para el condensador y la " pierna " barométrica.

El arreglo ( c ), que se emplea en Larderello ( Italia ), es una solución híbrida que requiere de una profunda perforación para la " pierna " barométrica y el uso de una bomba de extracción de agua caliente. El condensador de bajo nivel ( d ) es utilizado en las más recientes unidades en Los Geysers; se evita la perforación profunda del arreglo ( c ), pero requiere de una gran bomba para la extracción del condensado.

Una característica muy importante a considerar en los condensadores de aplicación geotérmica es la presencia de grandes cantidades de gases no condensables, algunos de ellos muy corrosivos. Estos gases reducen la eficiencia de todo el ciclo debido a una expansión con menor caída de presión y por lo tanto de entalpía. Hay que tomar en cuenta, según la Ley de Dalton de los gases perfectos, que la presión total en el condensador es la suma de las presiones parciales del vapor de agua, ácido sulfhídrico, bióxido de carbono y cual-



T. Turbina

C. Condensador de rocío

P. Pozo

PT. Piso de la turbina

NS. Nivel del suelo

F. Agua fría

CA. Agua caliente

DE. Ducto de escape

B. Bomba

ES. Estructura de soporte

SE. Sistema de enfriamiento

( bombas, río, lago, torre de enfriamiento, etc. )

PB. Pierna barométrica. Altura de la pierna barométrica

arriba del nivel del pozo

de agua = alrededor de 9 a

10 m, de acuerdo al vacío.

Fig. 2.14 Diferentes arreglos de condensadores de inyección y turbinas geotérmicas (a) Alto nivel de turbina (b) Bajo nivel de turbina: condensador externo (c) Fosa de condensado (d) Uso de bomba de extracción para ahorrar altura.

quier otro gas que este presente. Además, estos gases impiden un adecuado contacto entre el vapor y el refrigerante, reduciendo así la transferencia de calor.

Hay dos métodos comúnmente usados para extraer los gases no condensables acumulados en el condensador, los cuales se mencionan a continuación.

1) Eyectores de Vapor. El evector es en realidad un compresor de aire que usa el vapor para producir vacío, aspirar el gas y descargar la mezcla de gas y vapor a la atmósfera.

2) Bombas de Vacío. Las bombas de vacío son máquinas de desplazamiento positivo de aletas móviles o de pistón alternativo y tienen la ventaja de no requerir una instalación de tubería de vapor.

Las peores condiciones en el aspecto de corrosión se presentan, debido a las altas concentraciones de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), en el condensador y equipo de extracción de gases incondensables.

Debido a ello, en el equipo de extracción de gases se utilizan aceros inoxidables austeníticos; mientras que para el condensador se emplea acero al carbono con cubierta de acero inoxidable o de pintura polimérica. También se ha visto la posibilidad de construir un condensador de contacto directo de bajo nivel fabricado de concreto reforzado en las plantas geotérmicas de Hatchobaru<sup>(1)</sup>, Japón y Heber, California. Este consiste de un espacio formado dentro del cimiento de concreto de la unidad turbogeneradora y revestido con resina de polyester. Este tipo de construcción permite una mejor disposición del condensador (exactamente bajo la turbina) y un más bajo nivel de piso de la turbina.

---

(1) K. Aikawa, M. Soda. "Advanced Design in Hatchobaru Geothermal Power Station". Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources. San Francisco, 1975. V.3. p.p. 1881 a 1888.

## CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

### 3.1 GENERALIDADES.

El campo geotérmico de Cerro Prieto se encuentra ubicado en la parte noroeste de la República Mexicana, en el valle de Mexicali, al este de la Sierra de los Cucapá, en una planicie desértica del Delta del Río Colorado, aproximadamente a 35 km al sureste de la ciudad de Mexicali, capital del estado de Baja California Norte. Tiene como punto de referencia geográfica la prominencia volcánica, la cual presenta un aspecto externo de color negro ( debido a esto se le conoce como Cerro Prieto ) que alcanza una elevación de 260' m.s.n.m.. La temperatura varía entre 4 °C bajo cero en invierno y 51° C en verano. La precipitación media anual oscila entre 80 y 100 mm. La figura 3.1 muestra la ubicación de la zona y las principales vías de comunicación a dicho campo.

Debido a que la estructura geológica en el valle de Mexicali, está cubierta por sedimentos deltáicos, ha sido necesario, la aplicación de diferentes

técnicas geofísicas, con el fin de conocer el comportamiento y posición, tanto de las capas sedimentarias como del basamento granítico.

Hay muchas técnicas disponibles en el estudio geofísico, claro, variando ampliamente en confiabilidad y costo. A continuación se describirán brevemente algunas de las técnicas utilizadas para la exploración del campo geotérmico de Cerro Prieto.

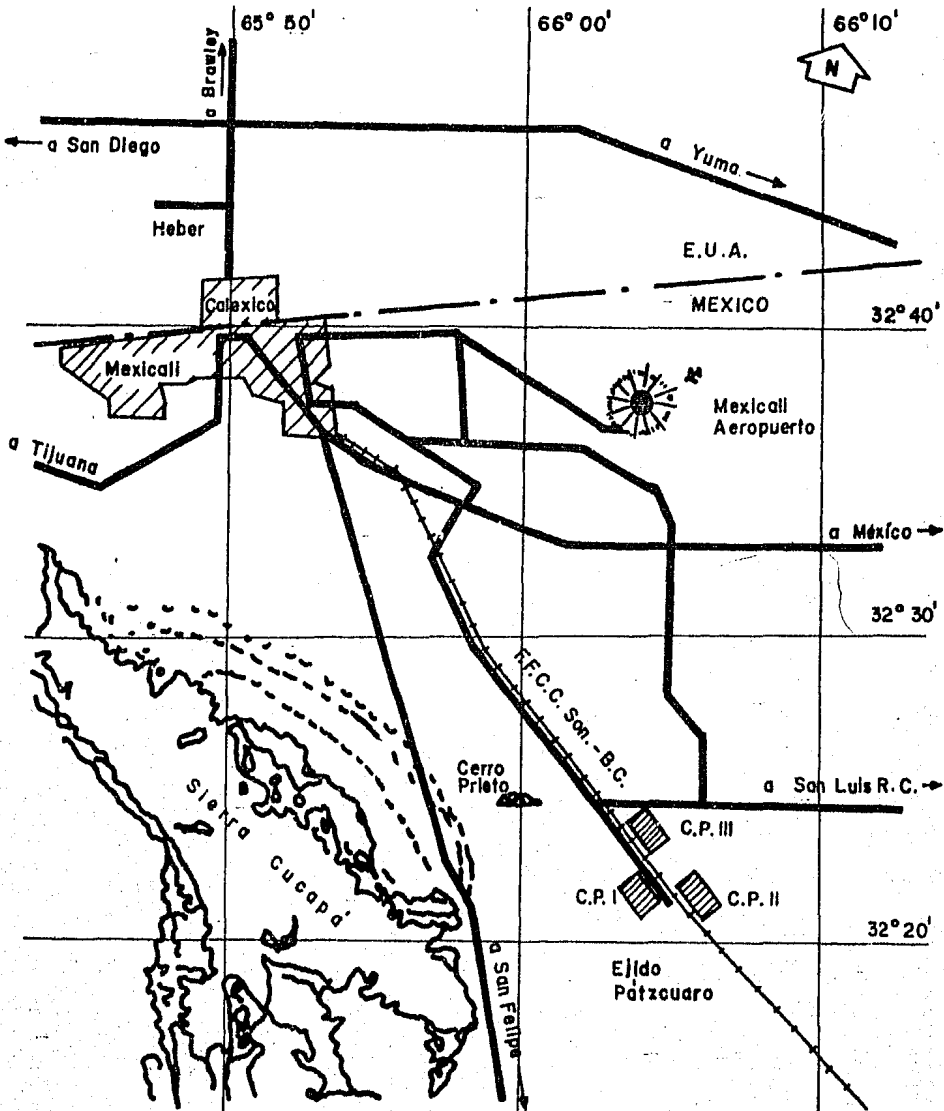


Fig. 3.1 Localización del campo geotérmico de Cerro Prieto.

a) Estudios Gravimétricos. Los estudios gravimétricos ayudan a:

- 1) Definir la estructura del subsuelo.
- 2) Localizar anomalías termales.
- 3) Delinear los depósitos autosellados de sílice.

Las técnicas de estudios gravimétricos son adecuadas en áreas de relieves con variación suave. Estas técnicas pueden también detectar algunas anomalías positivas asociadas con alteraciones y efectos metamórficos en las rocas del subsuelo. En otras áreas, tales técnicas pueden detectar anomalías negativas asociadas con masas intrusivas a profundidad.

b) Resistividad Eléctrica. La utilización de los métodos eléctricos en las exploraciones geotérmicas efectuadas en diferentes países, han demostrado ser una de las técnicas de mayor aplicación en el desarrollo de la energía geotérmica.

La disminución de la resistividad eléctrica debido a la elevación de la temperatura así como a la mayor concentración de sales en las zonas geotérmicas permiten delimitar las zonas calientes de las zonas frías.

Estudios eléctricos más profundos en combinación con otras técnicas y perforaciones exploratorias servirán para confirmar o modificar la información obtenida en dichos estudios.

c) Estudios Sísmicos. La Sismología Activa ( explosión ) como la Pasiva ( microtemblores ) pueden ayudar a la detección de algún reservorio geotérmico. En algunos casos, la atenuación sísmica es observable a través de los reservorios geotérmicos; esto es particularmente notable en los casos de reservorios grandes y en donde el contraste térmico también es grande.

En suma, usando estudios clásicos de sismología de reflexión y refracción ( análisis basados en energía de absorción y atenuación ) pueden ser localizados los reservorios geotérmicos. Las áreas geotérmicas normalmente muestran alta atenuación y una variación de baja frecuencia para transmitir on-

das sísmicas. Estos cambios pueden ser usados para un monitoreo de la temperatura interna del reservorio.

Así pues, en el campo geotérmico de Cerro Prieto se efectuaron estudios de geología y fotogeología con muy buenos resultados; sismología de refracción con la cual se definió la estructura del basamento y se localizó la falla principal en el subsuelo; geoquímica del flujo de manantiales que dió una indicación para seleccionar nuevos sitios de perforación así como las características probables del fluido geotérmico en el subsuelo; resistividad que definió las fronteras de la zona termal; gravimetría y aeromagnetismo que reafirmaron local y regionalmente la existencia de fallas; y también perforaciones de exploración de gran diámetro, alcanzando uno de los pozos 2630 m de profundidad.

La interpretación y correlación de los diversos estudios aunados a los excelentes resultados obtenidos en los pozos probados dieron una clara indicación de la gran potencialidad del campo. Con base a ello, se perforaron y se continúan perforando pozos de producción a la par con pozos de exploración, con el fin, estos últimos, de ampliar el conocimiento del subsuelo y determinar los límites del campo.

El campo geotérmico de Cerro Prieto que abarca tres áreas denominadas Cerro Prieto I, Cerro Prieto II y Cerro Prieto III, tiene una alineación preferencial NW-SE, siguiendo el alineamiento de la falla de Cerro Prieto. Su límite al SW se encuentra a 2.5 km de ésta falla. El límite al NE quedó aproximadamente a 5 km de la falla ya mencionada ( pozo Prian 1 de 3500 m de profundidad ). Idéntica situación se encontró en el extremo noroeste donde se definió un límite a 2 km del volcán de Cerro Prieto.

Los resultados obtenidos en la parte SE delimitaron el campo a 800 m del Ejido Pátzcuaro ( Ver figura 3.1 ). La excelente producción obtenida en esa zona, suponen una extensión mayor del campo. El valor de la resistividad disminuye sisténáticamente en esa dirección. No se descarta la existencia de una falla en ese extremo con rumbo NE-SW que profundiza la anomalía térmica en esa dirección.

### Estado Actual de Desarrollo en el Campo Geotérmico de Cerro Prieto.

- Central Cerro Prieto I. En 1973, se inició la generación de energía eléctrica mediante dos turbogeneradores de 37.5 MW cada uno, que han operado con el vapor geotérmico producido por 19 pozos. Dos unidades más de la misma capacidad iniciaron su operación comercial en abril de 1979, con el suministro de vapor de 14 pozos adicionales. En noviembre de 1981, se puso en operación una quinta unidad de baja presión, de 30 MW, accionada con vapor obtenido al evaporar en dos etapas el agua proveniente de las otras unidades, la cual anteriormente se desechaba. La capacidad total instalada actualmente es de 180 MW.

El efecto de la explotación del yacimiento durante 10 años, muestra una disminución promedio de  $12 \text{ kg/cm}^2$  en la presión y de  $10^\circ \text{ C}$  en la temperatura media; asimismo, una reducción en la producción promedio de vapor por pozo de aproximadamente 40 ton/h. Para solucionar el decremento de la productividad de los pozos, se construyeron pozos exploratorios más profundos ( 2200 m ) que confirmaron la existencia de un yacimiento de mayor capacidad que el original ( 1300 m ). Se ha procedido a construir pozos productores de reposición que, posiblemente, asegurarán el suministro de vapor a esta central durante los próximos años, se programó para el futuro, la construcción de tres pozos por año, con el fin de cubrir el déficit que se tendrá por el abatimiento de la presión del yacimiento y por llegar algunos pozos al límite de su vida útil, estimada en 10 años.

- Centrales Cerro Prieto II y Cerro Prieto III. En 1978 se determinó, por medio de la evaluación de pozos exploratorios localizados en la parte este del campo, que el potencial geotérmico total del yacimiento era superior a los 700 MW, durante un período mínimo de 20 años; razón por la cual se decidió la construcción de dos centrales más de 220 MW cada una, aumentando la capacidad total de las tres centrales geotermoeléctricas a 620 MW.

La central de Cerro Prieto II se destinará básicamente a cubrir el crecimiento de la demanda de energía en el Sistema Tijuana-Mexicali y la central de Cerro Prieto III a cumplir con el compromiso de venta de energía a Esta-



dos Unidos de Norteamérica. Se estima que las unidades 1 y 2 de Cerro Prieto II estén trabajando para 1984 y las unidades 1 y 2 de Cerro Prieto III para 1984 y 1985 respectivamente.

### 3.2 GEOLOGIA Y ORIGEN DEL VAPOR.

El campo geotérmico de Cerro Prieto se encuentra sobre un sistema de fallas escalonadas, el cual pertenece a la gran serie de fracturas que cubren la mayor parte del estado norteamericano de California. La topografía local está dominada al noroeste, por el volcán de Cerro Prieto, y la Sierra de los Cucapá al oeste. Al suroeste predominan la Laguna Volcano y un cráter freático.

Como resultado de diferentes estudios geológicos y geofísicos efectuados en el campo de Cerro Prieto, se ha determinado la estructura subterránea de la zona y la edad aproximada de cada formación. En la figura 3.2 se puede observar un corte geológico del campo geotérmico de Cerro Prieto con sus principales formaciones, las cuales se describen a continuación.

a) Basamento Granítico. Se encuentra aproximadamente a 2547 m de profundidad y presenta un grado de fracturamiento muy alto ya que la zona está tectónicamente relacionada con el sistema de fallas de San Andrés. La edad probable de las rocas intrusivas que forman el basamento de la estratigrafía de la zona, se le atribuye al cretácico. Se considera también que esta roca basal, debido al intenso fracturamiento, dio origen a una gran fosa que hoy es el valle de Mexicali. La Sierra de los Cucapá pertenece a este tipo de roca.

b) Lutitas y Areniscas. Se encuentran por encima del basamento granítico aproximadamente a partir de los 700 m de profundidad y en capas alternadas. Las areniscas son capas más permeables y porosas, estando por lo tanto saturadas de agua sobrepresionada, y esto se debe al flujo de agua y vapores de alta temperatura provenientes de la capa interior a través de las fracturas escalonadas. En esta capa es donde se encuentra almacenado el fluido geotérmico del área en explotación.

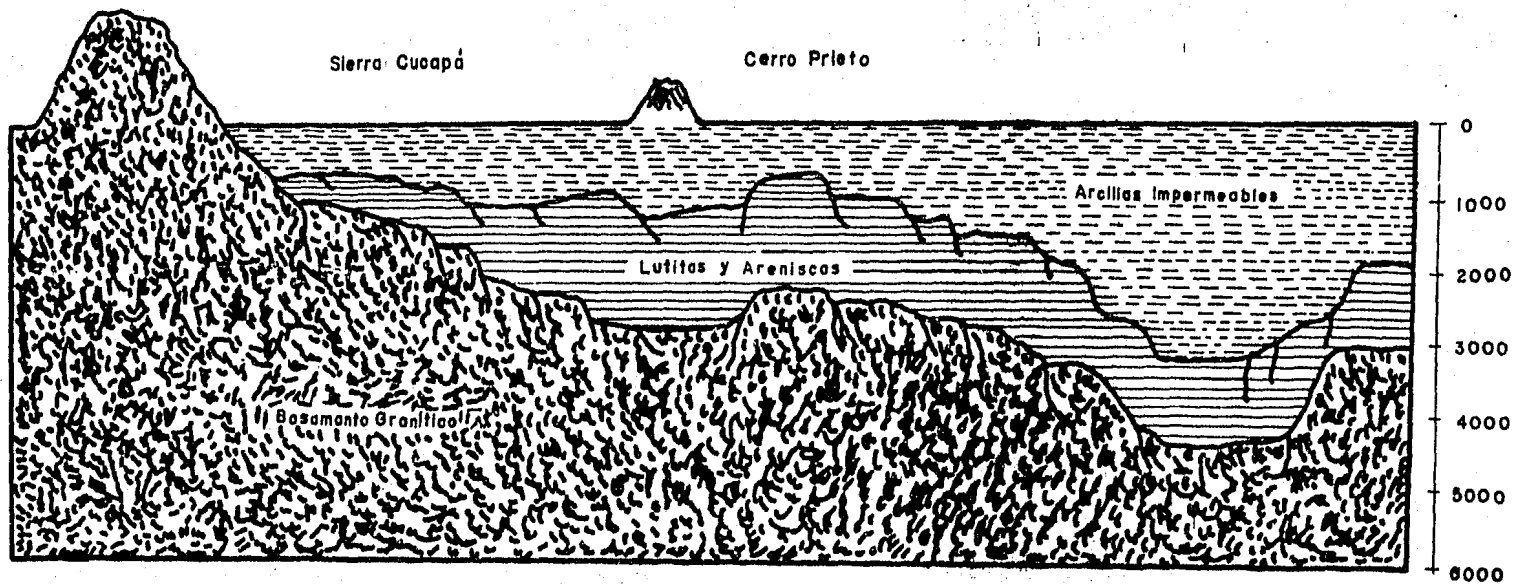


Fig. 3.2. Corte geológico del campo geotérmico de Cerro Prieto.

c) Arcillas Plásticas Impermeables. Esta capa está formada por grava, gravilla y arena, que fueron acarreadas y depositadas por el Río Colorado en una amplia zona que forma actualmente el valle de Mexicali en México y los valles de Imperial y Yuma en California y Arizona respectivamente, en los Estados Unidos de Norteamérica.

Estos sedimentos, que tienen la característica de ser impermeables, forman un estrato que sobreyace a la capa constituida por las lutitas y areniscas, los cuales hacia al sur del campo llegan a tener hasta 3000 m de espesor.

El área se encuentra sumamente afectada por un conjunto de fallas paralelas derivadas de la falla de San Andrés que proviene del norte de San Francisco, California, en los Estados Unidos de Norteamérica y llega hasta el Golfo de California en México ( Ver figura 3.3 ). Estas fallas se encuentran dirigidas de noroeste a sureste destacando entre ellas por su relación con el campo geotérmico, la falla de San Andrés que corta al valle de Mexicali en su extremo noreste; la falla Imperial que pasa al este de la ciudad de Mexicali la falla de San Jacinto que pasa también al este de la ciudad de Mexicali y la falla de Cerro Prieto que atraviesa al campo geotérmico.

En el transcurso de millones de años este conjunto de fallas ha fracturado y desplazado tanto el basamento granítico como los estratos sedimentarios que lo sobreyacen y es a través de estas fracturaciones y dislocaciones de la corteza terrestre por donde emigra el calor y diversos gases, que como se menciona en el Capítulo 1, provienen de una gran masa de magma ( roca fundida ).

El sello hidráulico formado por el estrato impermeable ( arcillas ) no es del todo perfecto, ya que debido a las fallas geológicas ya mencionadas, se tiene en este estrato algunas fisuras y agrietamientos, por donde se filtra el agua, vapor, gases y calor que almacena el reservorio, aflorando a la superficie terrestre, mostrándose manifestaciones hidrotermales como son: manantiales de agua caliente, volcánes de lodo y fumarolas.

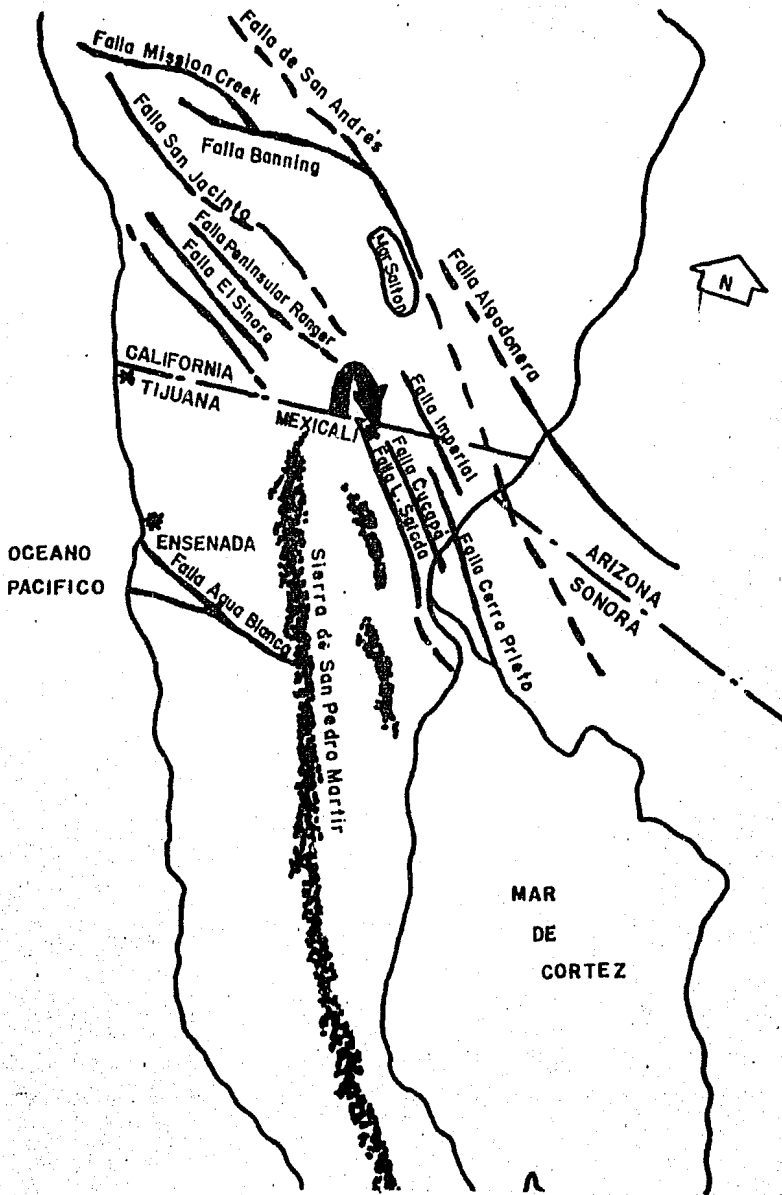


Fig. 3.3 Afallamientos del sistema de San Andrés.

### 3.3 CARACTERISTICAS DE LOS POZOS.

#### Arreglo Típico del Equipo de Perforación.

Antes de que se inicien las operaciones de perforación es necesario construir un contrapozo de concreto de aproximadamente 3 x 2.5 x 3 m para soportar todo el peso del equipo utilizado y posteriormente para acomodar las válvulas del cabezal.

Los métodos y equipos normalmente empleados para la perforación geotérmica básicamente no difieren mucho de aquellos usados para la extracción de petróleo o gas natural, este equipo es portátil y adaptable para ser movido de un sitio a otro. En la perforación geotérmica normalmente se encuentran formaciones de roca más dura y con mayor temperatura que en la perforación petrolera; además de la presencia de fluidos corrosivos.

El pozo se perfora haciendo girar una barrena, la cual está sujeta a la tubería de perforación. Dicha tubería consiste en tramos de tubo de 9 a 10 m de largo, de pared delgada atomillada y se hace girar desde la superficie, generalmente, por medio de un motor diesel. El ensamble de la tubería de perforación está soportado por una torre de acero, conteniendo un equipo de poleas para posicionar y colocar los tramos de tubería de perforación y de recubrimiento; así como dar acceso a ellos para examinarlos y unirlos antes de ser bajados e introducidos a la tierra.

En la figura 3.4 se ilustra un arreglo típico de perforación y terminación de un pozo geotérmico con sus principales componentes.

A continuación se enlistan las componentes más importantes en un equipo de perforación geotérmica, junto con una breve explicación de sus características.

1) Barrenas. La mayoría de las perforaciones geotérmicas emplean barrenas giratorias con dientes de acero endurecido o insertos de carburo de tungsteno. El acero usado en dichas barrenas tienen un límite práctico de utiliza-

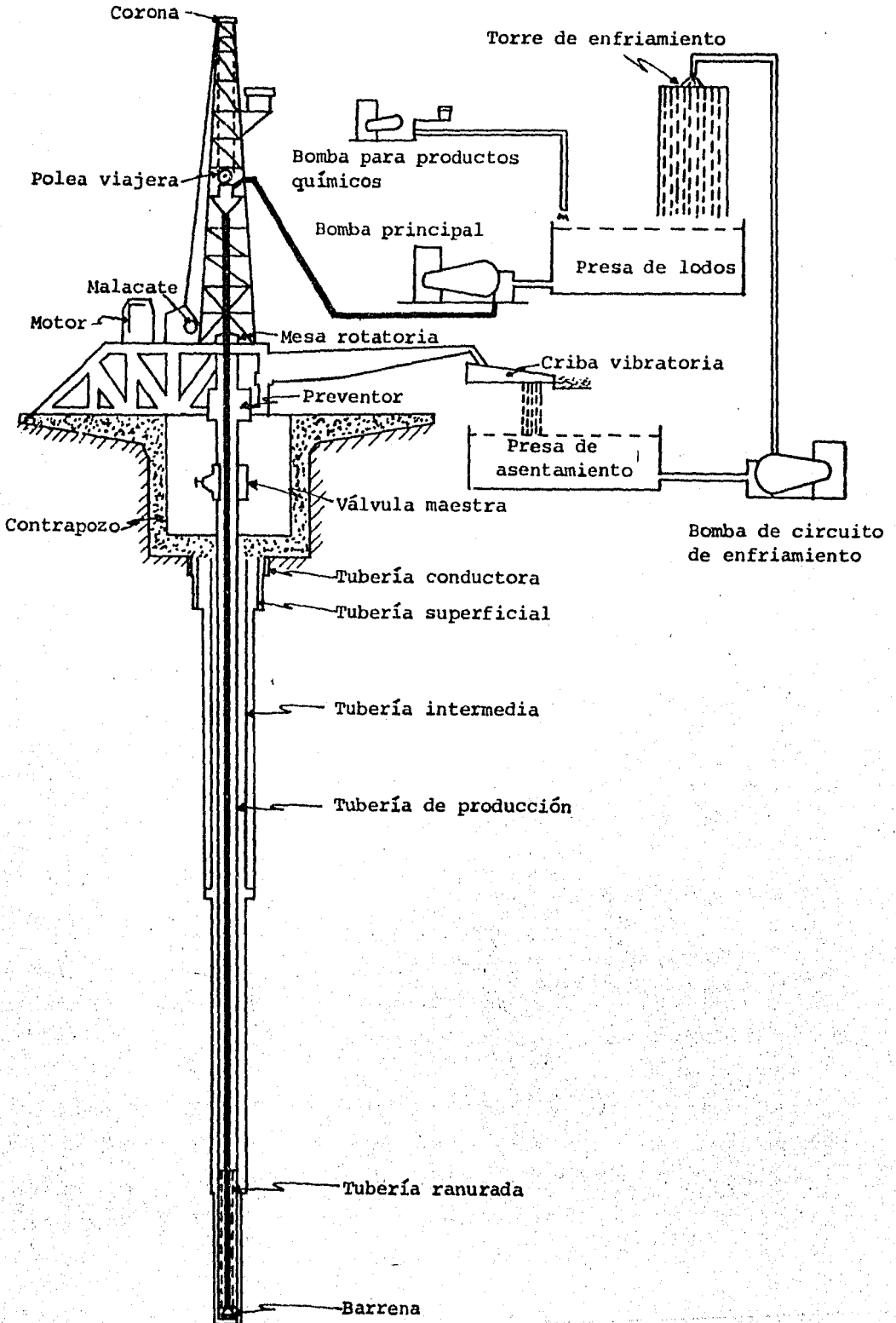


Fig. 3.4 Equipo de perforación y terminación de un pozo geotérmico.

ción, el cual es de 200 a 230° C, ya que a estas temperaturas pierden mucha resistencia. La retención de los insertos a altas temperaturas es un problema, ya que el acero tiene un coeficiente de expansión térmico mayor que el del carburo de tungsteno, por lo tanto el acero se expande en mayor grado que el inserto de carburo, disminuyendo el grado de sujeción entre el acero y el inserto.

Las barrenas de diamante pueden perforar a temperaturas mayores de 530° C, pero son mucho más lentas que cualquier otro tipo. El uso de este tipo de barrenas no es una solución satisfactoria al problema de la perforación geotérmica a alta temperatura.

2) Lodos de Perforación. El propósito del lodo de perforación es enfriar y lubricar la barrena y la tubería de perforación, llevar a la superficie los cortes de roca y prevenir que las paredes del pozo se hundan antes de poner el ademe. El lodo se inyecta a través de la tubería de perforación y barrena y emerge por el espacio anular exterior formado por dicha tubería y las paredes interiores del pozo. En la superficie se separan las partículas de roca arrastradas y se reacondiciona el lodo para mantener sus propiedades deseadas (viscosidad y punto de cedencia). Antes de reinyectar el lodo se hace pasar por una torre de enfriamiento para disminuir su temperatura, evitar que pierda agua y mantener estables sus propiedades. Los lodos más utilizados son a base de bentonita que son una mezcla de arcillas suspendidas en agua.

3) Recubrimiento. Uno de los factores más importantes en la perforación es la colocación de un ademe adecuado de acero a las profundidades correctas en función del tipo de estrato y yacimiento. Normalmente habrá hasta cuatro recubrimientos concéntricos en un solo pozo, todos hechos de acero de alta calidad. El ademe está fijo a las formaciones que lo rodean por medio de cemento y unidos entre sí por medio de uniones roscadas. La principal función de la cementación es fijar el ademe a las formaciones geológicas circundantes, aislando y protegiendo la tubería contra las presiones de los estratos anteriores al reservorio. La profundidad a la cual cada recubrimiento quedará instalado, dependerá de la naturaleza de los estratos geológicos a través

de los cuales el pozo es perforado.

La figura 3.5 muestra un arreglo típico de tuberías de recubrimiento utilizado en Cerro Prieto y de acuerdo a las funciones que realiza cada una es posible clasificarlas de la manera siguiente:

a) Tubería conductora. Su objetivo primordial es evitar la erosión o la inundación del pozo en la base del equipo, además de proporcionar un conducto tubular para elevar el fluido de perforación a la superficie.

b) Tubería superficial. Esta sección se introduce para proteger al pozo de cavidades internas o fallas que se presentan generalmente cerca de la superficie. También protege al pozo de las filtraciones de agua de los mantos acuíferos superficiales y se utiliza para soportar las formaciones flojas no consolidadas.

c) Tubería intermedia. Su objetivo es aislar zonas arenosas o de arcilla hidratable y proporciona el anclaje del árbol de válvulas.

d) Tubería productora. Con esta tubería se sitúa la zona productora y se solucionan problemas tales como zonas con tendencia a la fractura, aísla la zona de producción evitando flujos de otras formaciones y es el conducto que estará en contacto permanente con el fluido geotérmico.

e) Tubería corta. En la parte más baja del pozo está una tubería ranurada con una pequeña separación de las paredes del pozo. Su propósito es actuar como coladera para detener grandes pedazos de roca que pueden romper las paredes del pozo.

#### Evaluación y Método de Apertura.

Los pozos geotérmicos de Cerro Prieto pasan por varias etapas antes de su operación comercial, durante las cuales aumentan continua y paulatinamente la presión y temperatura del ademe y del cabezal del pozo. Al mismo tiempo que esto sucede, y en forma sistemática, se corren registros de temperatura,



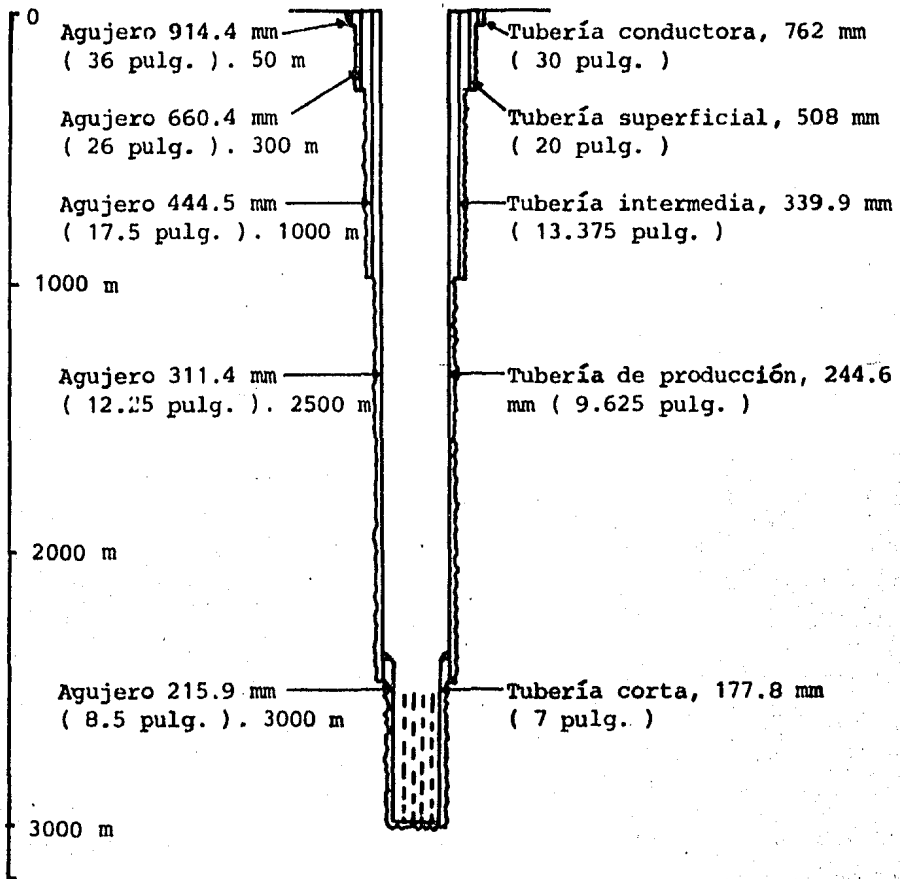


Fig. 3.5 Tuberías de recubrimiento.

presión, gasto, elongación que permiten evaluar el comportamiento de las tuberías del ademe y del pozo, auxiliándose con el análisis geoquímico para determinar la calidad del fluido geotérmico arrojado por el pozo.

Considerando que el sistema operacional en los pozos al iniciar la explotación se tienen que conservar en buen estado sus elementos constructivos, es necesario distinguir varias etapas, las cuales se explican brevemente a continuación.

a) Período de observación. Inmediatamente después de haber lavado el pozo, se conectan a la válvula maestra manómetros y registradores de presión; simultáneamente a dicha instalación se coloca el indicador y la escala adecuada para medir el crecimiento de las tuberías de ademe, como resultado de la expansión longitudinal por efecto térmico ( Ver figura 3.6 ).

En esta etapa se tiene especial cuidado en vigilar el nivel de la columna de agua ( sólo en campos hidrotermales ) verificando en forma periódica si existe elevación del mismo.

b) Período de calentamiento. Consiste en elevar la presión y temperatura, la idea básica es tratar de que el calor se propage a la tubería intermedia, a la tubería superficial y a las formaciones que circundan el pozo. Es conveniente instalar en el árbol de válvulas una línea de descarga de 2 pulgadas de diámetro con tres ramales de 1/2, 1 y 2 pulgadas ( Ver figura 3.6 ), todas provistas de una válvula de control. El método de operación es el siguiente: se empieza con la rama de 1/2 pulgada de diámetro, aumentando su descarga de presión en la cabeza del pozo a  $2 \text{ kg/cm}^2/\text{día}$  hasta abrir totalmente la válvula. Se sigue el mismo procedimiento para los ramales de 1 y 2 pulgadas de diámetro. El límite final de presión dependerá del comportamiento de cada pozo y las distintas observaciones en la superficie y en el subsuelo.

c) Desarrollo. En esta etapa el pozo se descarga por un diámetro restringido el cual se va incrementando hasta llegar al diámetro total de producción. El objetivo final es llegar a obtener las características de producción del pozo en cuanto a presión, temperatura, gasto y entalpía; además de permitir ( debido a la mayor cantidad de flujo ) la eliminación de pequeños fragmentos de areniscas, lutitas y restos de cemento. Con esto se puede evitar que al conectar el pozo con el separador y sistema colector de vapor se pudieran dañar las instalaciones superficiales y turbinas de la planta. El fluido arrojado comúnmente es de color oscuro debido a los residuos del lodo de perforación, que muy seguramente invadió el yacimiento.

El equipo utilizado para esta etapa se encuentra en una de las descargas la-

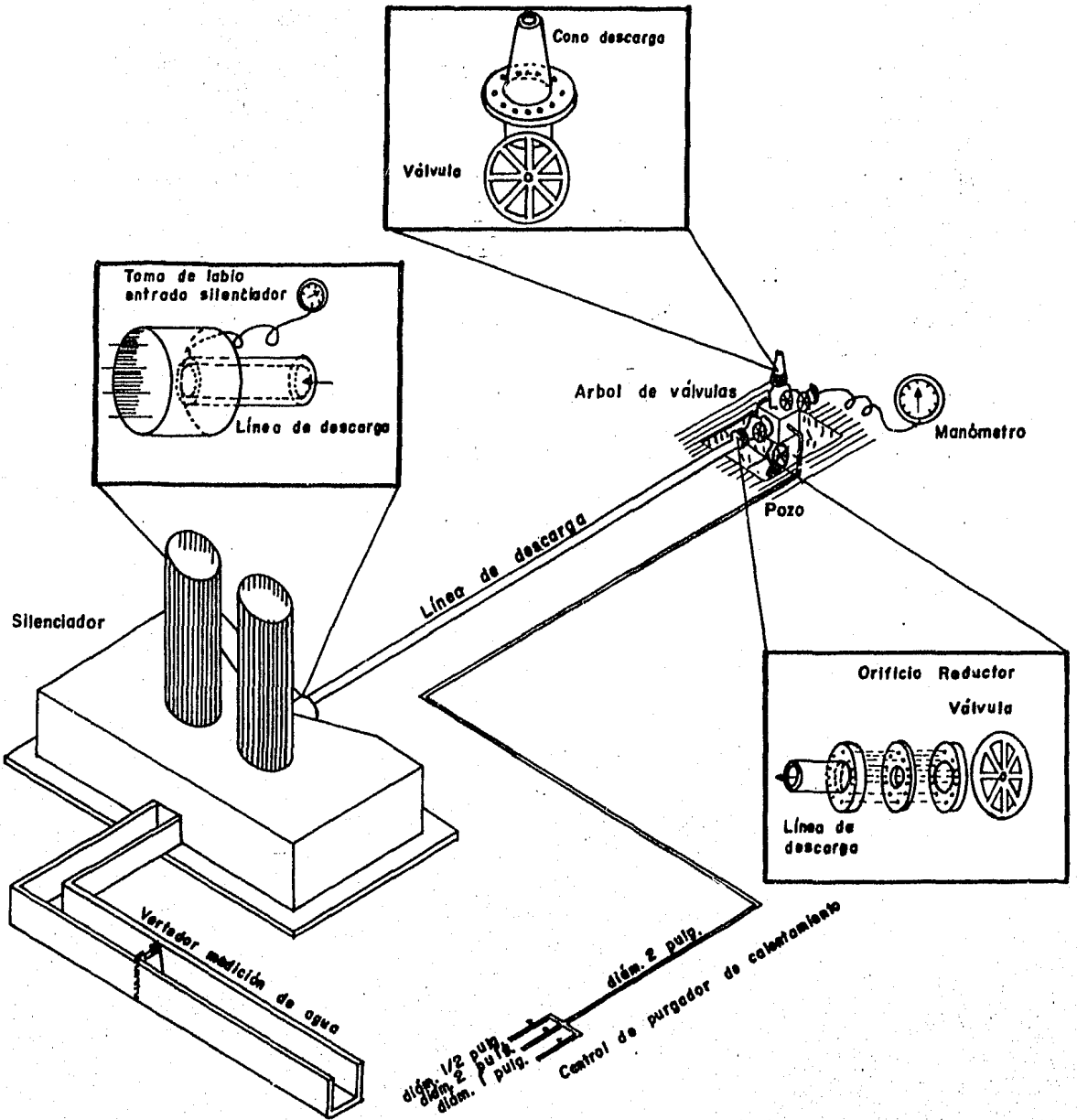


Fig. 3.6 Instalaciones superficiales empleadas para calentamiento, desarrollo y medición de un pozo.

terales del árbol de navidad, en la cual se instalan orificios de diámetros variables ( 3, 4, 5 y 6 pulgadas ). Sobre la válvula de operación se instalan una serie de conos con los mismos diámetros de las placas ( Ver figura 3.6 ).

El método de operación es el siguiente: se abre la válvula de operación y así el pozo descargará verticalmente a la atmósfera a través del cono de 3 pulgadas de diámetro, después de haberse estabilizado las condiciones de presión y temperatura, se hace con cuidado el cambio del flujo vertical a la línea lateral, cerrando con suma lentitud la válvula superior y con el mismo ritmo se abre la válvula lateral. Cerrada la descarga vertical se cambia el cono instalado por uno de 4 pulgadas de diámetro y se invierte la operación para descargar el pozo en forma vertical. Cerrada la descarga lateral se cambia el diámetro del orificio. Se repite este procedimiento hasta llegar al diámetro de producción. Durante el desarrollo de un pozo se miden los flujos de descarga, se instala una toma de presión de labio ( Ver figura 3.6 ) en una línea de descarga lateral conectada a un silenciador, para aplicar el método de Rusell James<sup>(1)</sup>, aplicable tanto a flujos de vapor seco como a mezclas de agua-vapor.

Habiendo terminado el desarrollo se obtienen una serie de registros de presión y temperatura, variando los flujos de descarga, efectuando al final un registro de calibración en la tubería de producción. Se acostumbra mostrar los resultados en las curvas características de producción, de donde se deduce el potencial. La figura 3.7 muestra un ejemplo de dichas curvas.

---

(1) Rusell James. Rapid Estimation of Electric Power Potential of Discharging Geothermal Wells: Second UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, 1975. V.3, p.p. 1685 a 1687.

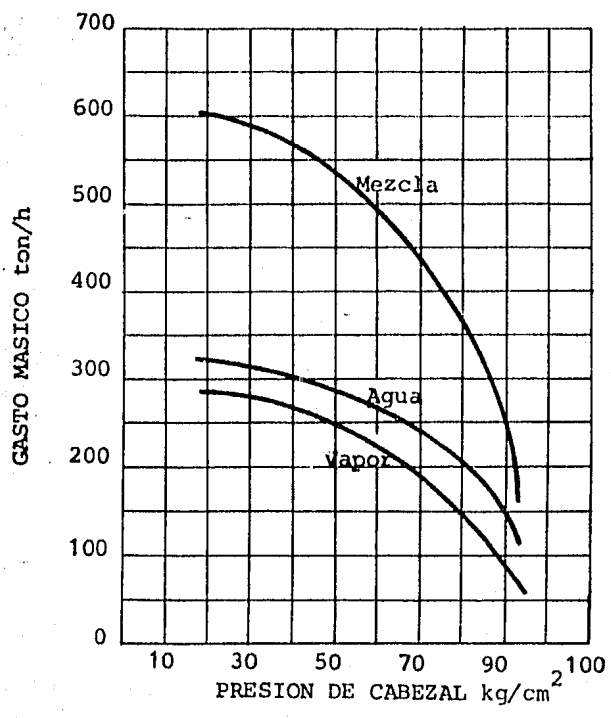


Fig. 3.7 Curvas características de producción de un pozo.

### 3.4 CARACTERISTICAS DEL FLUIDO.

La producción de los pozos geotérmicos de Cerro Prieto consiste en una mezcla agua-vapor en la que predomina la fase líquida, por lo que para utilizar dicha mezcla se requiere separar el agua y enviar el vapor seco a las turbinas de la planta geotermoeléctrica.

Básicamente cada pozo cuenta con una presión de yacimiento que debe vencer la presión de la columna hidrostática de altura igual a la profundidad a que se encuentra el reservorio. En muchas ocasiones es necesario ayudar a este fenómeno con medios artificiales tales como pistoneo y cubeteo.

El primer procedimiento es el que habitualmente se ha utilizado para el desarrollo y limpieza de pozos de agua y ocasionalmente en pozos petroleros.- El cubeteo es una variante del sistema de pistón y como su nombre lo indica, se utiliza una cubeta, con el propósito de achicar el pozo. Estos dos sistemas pueden llegar a producir un arranque instantáneo en el pozo, lo que originará el calentamiento rápido de la tubería de producción.

Tomando como sistema termodinámico al fluido que asciende por la tubería de ademe hacia la superficie, y como fronteras del sistema las paredes de dicha tubería, se tendrá lo siguiente:

Al ascender el fluido geotérmico a través de la tubería de producción, disminuirá la columna hidrostática por lo que el sistema experimentará un descenso de presión efectuándose una expansión y una parte de la masa del fluido que asciende ebullicará. Puesto que la transferencia de calor a través de la tubería de ademe es nula o casi nula, se considera el sistema como adiabático ya que no existe transferencia de calor con el exterior ( se tiene un armazón de concreto y aditivos rodeando las paredes de la tubería, haciendo la función de aislante térmico ).

Luego, la masa de fluido que ebulle tomará su calor latente del calor sensible del líquido saturado teniéndose una disminución en la temperatura del sistema y puesto que el sistema no intercambiará calor con el medio ambiente

ni realiza algún trabajo mecánico, se habrá efectuado en este ascenso del fluido hacia la superficie, un proceso isoentálpico y aproximadamente isoentrópico ya que se tiene un pequeño incremento de entropía debido a la fricción existente entre el fluido que asciende y las paredes de la tubería.

A medida que el fluido geotérmico continúa ascendiendo a la superficie, continúa experimentando gradualmente el proceso antes descrito por lo que en la superficie se obtiene una mezcla agua-vapor. En la figura 3.8 se muestra en un diagrama temperatura-entropía el proceso termodinámico que experimenta el fluido geotérmico en su trayecto del reservorio hacia la superficie terrestre.

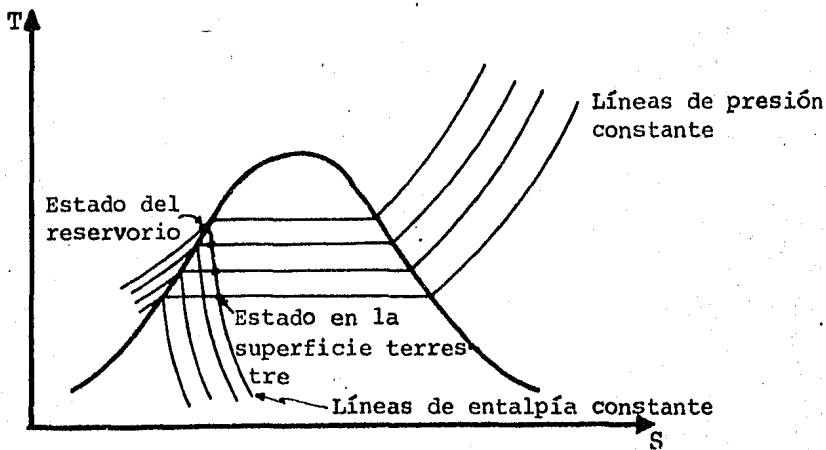


Fig. 3.8 Proceso termodinámico que experimenta el fluido geotérmico en su trayecto del reservorio a la superficie terrestre.

La mezcla en la cabeza de los pozos es separada mediante un separador centrífugo. El vapor separado es enviado a la planta generadora de electricidad y viene acompañado de una serie de gases entre los cuales los más importantes por su concentración son el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Se tienen también pequeñas concentraciones de argón, metano nitrógeno e hidrógeno.

Debido al contenido de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  en el vapor, este adquiere un carácter co-

rosivo lo cual acarrea problemas en tuberías y equipo. Sus características varían de uno a otro pozo debido a las diferentes condiciones del fluido en el yacimiento geotérmico.

En lo que respecta al agua separada, esta es desechada a una laguna de evaporación y contiene una alta concentración de sólidos disueltos. Los niveles de concentración de los compuestos químicos presentes en esta agua dependen de la temperatura y presión del yacimiento geotérmico así como de la composición química de la salmuera resultante varía de un pozo a otro ya que a diferentes áreas de producción dentro del yacimiento acuífero pueden existir diferencias significativas en la composición mineral, presión y temperatura.

El cloruro de sodio, cloruro de potasio y sílice, son los principales componentes en la salmuera geotérmica de Cerro Prieto, pero en sí la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) es lo que ocasiona grandes problemas debido a la tendencia a precipitar formando incrustaciones muy considerables y sumamente difíciles de remover en tuberías, equipos y válvulas. En la tabla 3.1 se muestra el contenido de los diversos componentes químicos que forman parte de la salmuera geotérmica de los pozos en operación de Cerro Prieto.

Las incrustaciones se ven incrementadas a bajas temperaturas y presiones y constituyen uno de los mayores problemas en el campo geotérmico de Cerro Prieto.



SUSTANCIA		RANGO EN P.P.M.
Na	Sodio	4330 - 9090
K	Potasio	550 - 2580
Ca	Calcio	216 - 490
Li	Litio	6 - 19
Rb	Rubidio	10 - 52
	Cloruros	4100 - 17120
B	Boro	7 - 20
SiO <sub>2</sub>	Sílice	610 - 1160
HCO <sub>3</sub>	Carbonato Acido	60 - 170
S.T.D.Sólidos Totales Disueltos		7690 - 30170
p.h.		6.8 - 7.85

Tabla 3.1 Composición Química del Agua Separada en los Pozos de Producción de Cerro Prieto, B.C.N.

NOTA: Los valores reportados en esta tabla, están basados en los análisis químicos de agua separada a presión de separación de pozos en producción, realizados por la Superintendencia General de Estudios de la Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto ( C.F.E. ). Fecha: Mayo 1980.

## METODOS DE DIMENSIONAMIENTO DE TUBERIAS Y EQUIPOS

## 4.1 INTRODUCCION.

Un esquema básico del ciclo con dos etapas de separación se muestra en la figura 4.1.

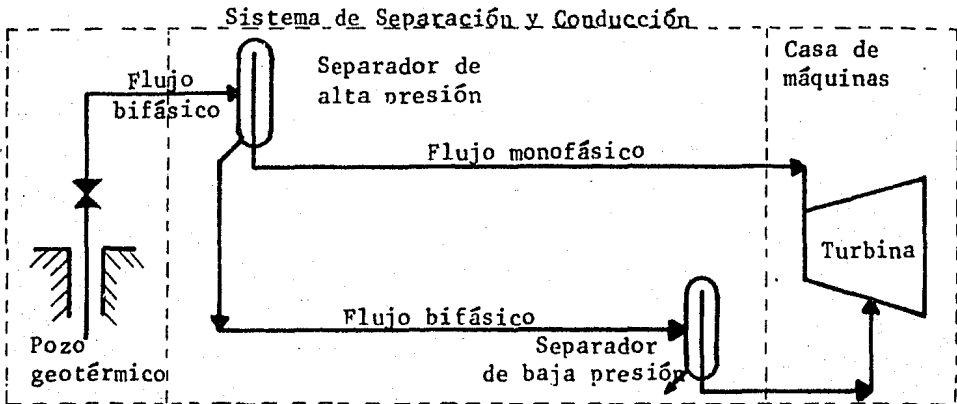


Fig. 4.1

Podemos observar que para el dimensionamiento de todo el sistema de conducción desde el pozo geotérmico hasta la casa de máquinas requerirá básicamente del dimensionamiento de las líneas conductoras y del equipo de separación.

Las líneas conductoras pueden ser de flujo monofásico ( agua o vapor ) o de flujo bifásico ( agua y vapor ), teniendo cada una diferentes problemas y consideraciones en su dimensionamiento; además toda línea sujeta a una alta temperatura sufrirá una expansión térmica que debe ser absorbida para evitar daños a los equipos y a la tubería misma.

Para evitar pérdidas de energía se requiere dotar a las tuberías de un adecuado aislamiento térmico.

Se requiere además del diseño del equipo de separación, tanto en sus condiciones de proceso como en su construcción mecánica, para que garantice las características del vapor requeridas para alimentar a la turbina.

#### 4.2 DIMENSIONAMIENTO DE LAS LINEAS DE CONDUCCION.

A continuación se presentan los procedimientos de cálculo, recomendaciones y restricciones para el dimensionamiento de las líneas de conducción y equipo de separación, los cuales servirán para analizar y evaluar las alternativas de conducción de fluido geotérmico y la localización de equipo presentadas en el Capítulo 5.

##### 4.2.1 Dimensionamiento de Tuberías Conductoras de una Fase.

Se presenta un procedimiento para obtener el diámetro de la tubería conductora en base a garantizar una velocidad recomendada dentro de la misma.

##### Datos Requeridos.

$P$  = Presión de operación [ Pa abs. ]

$\nu$  = Viscosidad cinemática [ kg/m s ]

- $\varepsilon$  = Rugosidad absoluta de la tubería [m]  
 $v$  = Volumen específico del fluido [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]  
 $K$  = Coeficiente de pérdida de presión por accesorios  
 $L$  = Longitud de la tubería [m]  
 $W_T$  = Gasto másico del fluido [kg/s]

### Recomendaciones.

- 1) La velocidad del vapor saturado en la tubería debe de estar comprendida en un rango de entre 30 y 50 m/s.
- 2) La velocidad del líquido saturado en la tubería debe estar comprendida en un rango de entre 1 y 5 m/s.

### Cálculos.

El flujo volumétrico será:

$$\begin{aligned}
 Q &= \text{Flujo volumétrico} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \\
 &= W_T v \quad (1)
 \end{aligned}$$

La obtención del diámetro requerido para las condiciones de flujo viene dado en función de las velocidades recomendadas y el flujo volumétrico.

$$\begin{aligned}
 D_i &= \text{Diámetro} \quad [\text{m}] \\
 &= \sqrt{\frac{4Q}{\pi V_{\text{recom.}}}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Este diámetro se ajusta a un valor comercial de diámetro interno  $D$  y se verifica que la velocidad real quede dentro del rango de velocidades recomendadas.

$$\begin{aligned}
 V &= \text{Velocidad del fluido} \quad [\text{m/s}] \\
 &= \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (3)
 \end{aligned}$$

$Re$  = Número de Reynolds del flujo

$$= \frac{VD}{\nu} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\epsilon}{D} &= \text{Rugosidad relativa} \\ &= \frac{\epsilon}{D} \end{aligned} \quad (5)$$

Con  $Re$  y  $\frac{\epsilon}{D}$  se obtiene el factor de fricción, ya sea en el diagrama de Moody o con la solución numérica de la Ecuación de Colebrook.

La longitud equivalente de cualquier accesorio presente en la tubería se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} L_{EQ} &= \text{Longitud equivalente del accesorio [m]} \\ &= K \frac{D}{f} \end{aligned} \quad (6)$$

Donde:

$K$  = Coeficiente de pérdida de presión por accesorio

$D$  = Diámetro interno de la tubería [m]

$f$  = Factor de fricción

Finalmente la caída de presión será:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \text{Caída de presión en flujo monofásico [Pa abs.]} \\ &= \frac{V^2}{2V} \frac{f}{D} (L + L_{EQ}) \end{aligned} \quad (7)$$

Donde:

$V$  = Velocidad real del fluido [m/s]

$v$  = Volumen específico del fluido [m<sup>3</sup>/kg]

$f$  = Factor de fricción

$D$  = Diámetro interno de la tubería [m]

$L$  = Longitud de la tubería [m]

$L_{EQ}$  = Longitud equivalente de accesorios [m]

#### 4.2.2. Dimensionamiento de Tuberías Conductoras de Mezcla Bifásica.

Para el cálculo de caída de presión en flujo bifásico se han realizado considerables trabajos teóricos y experimentales, pero aún no se dispone de una correlación exacta. Lo presentado aquí son guías para la estimación de caídas de presión con flujo bifásico en una tubería dada.

Para efectos de esta tesis se estudiaron principalmente dos métodos para el cálculo de la caída de presión en flujo bifásico, éstos son:

- 1) Lockhart-Martinelli.
- 2) Dukler. Casos I y II.

A continuación se plantean los principios fundamentales de cada uno de estos métodos.

- 1) Método de Lockhart-Martinelli.

Lockhart y Martinelli<sup>(1)</sup> propusieron una correlación para sistemas adiabáticos en baja presión; su desarrollo está basado en las siguientes consideraciones:

- a) La caída de presión estática para la fase gaseosa es igual a la fase líquida, sin importar el patrón de flujo.
- b) Las pérdidas de presión debidas a la gravedad y al cambio de momento son despreciables.
- c) Se considera proceso isoentálpico.

La base de la correlación es que la caída de presión del flujo bifásico es igual a la caída de presión en una fase multiplicada por un factor, que es función de las caídas de presión en flujo monofásico de cada una de las fases.

Los gradientes de presión en una fase  $(\frac{\Delta P}{\Delta L})_L$  y  $(\frac{\Delta P}{\Delta L})_G$  son calculados con la Ecuación de Darcy, asumiendo que cada fase está fluyendo sólo en la tubería.

---

(1) Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C. 1949. " Proposed Correlation of Data for Isothermal, Two-Phase, Two-Component Flow in a Pipe ". Chem. Eng. Prog., 45. p. 39.

Los parámetros utilizados para este método se definen como sigue:

$$\chi = \frac{\left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_L}{\left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_G} \quad (1)$$

$$\phi^2 = \frac{\left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{DF}}{\left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_L} \quad (2)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_L &= \text{Gradiente de presión considerando flujo de líquido} \quad [\text{Pa abs./m}] \\ &= \frac{V^2}{2v_f} \frac{f}{D} \quad (3) \end{aligned}$$

$V$  = Velocidad del flujo de líquido [m/s]

$v_f$  = Volumen específico del líquido [m<sup>3</sup>/kg]

$D$  = Diámetro interno de la tubería [m]

$f$  = Factor de fricción

$$\begin{aligned} \left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_G &= \text{Gradiente de presión considerando flujo de gas} \quad [\text{Pa abs./m}] \\ &= \frac{V_g^2}{2v_g} \frac{f}{D} \quad (4) \end{aligned}$$

$V_g$  = Velocidad del flujo de gas [m/s]

$v_g$  = Volumen específico del gas [m<sup>3</sup>/s]

$D$  = Diámetro interno de la tubería [m]

$f$  = Factor de fricción

De la Ec. (2) el gradiente de presión del flujo bifásico será:

$$\left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{DF} = \phi^2 \left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_L \quad (2a)$$

La relación entre los parámetros  $\chi$  y  $\phi^2$  viene dada por las siguientes curvas, en función del tipo de flujo presente (laminar o turbulento) en cada fase. (Ver figura 4.2).

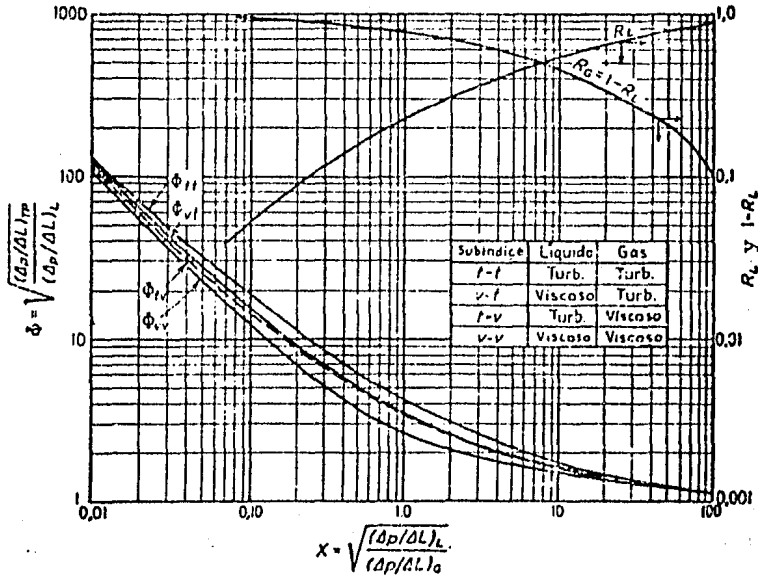


Fig. 4.2 Curvas de Lockhart y Martinelli.

2) Método de Dukler.

El método de Dukler<sup>(1)</sup> parte del análisis de similitud en la obtención de los números adimensionales de Euler y Reynolds para flujo monofásico y bifásico, lo que permite la obtención de las propiedades de la mezcla con las relaciones:

$$\rho_{DF} = \rho_L \frac{\lambda_L^2}{R_L} + \rho_V \frac{(1 - \lambda_L)^2}{R_V} C_I \tag{5}$$

$$\mu_{DF} = \mu_L \lambda_L + \mu_V (1 - \lambda_V) C_{II} \tag{6}$$

Donde:

$\lambda_L$  = Relación del flujo volumétrico de líquido al flujo volumétrico total

$$= \frac{Q_L}{Q_L + Q_G} \tag{7}$$

(1) Dukler, A.E., Wicks M., and Cleveland R. 1962. " Pressure Drop and Hold-up in Two-Phase Flow; Part B An Approach Through Similarity Analysis ".

AICHE Journal 10, 10, p.p. 38-51.



$R_L$  = Fracción volumétrica de líquido

$R_G$  = Fracción volumétrica de gas

$\rho_{DF}$  = Densidad de la mezcla bifásica [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_L$  = Densidad del líquido [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_G$  = Densidad del gas [kg/m<sup>3</sup>]

$\mu_{DF}$  = Viscosidad de la mezcla bifásica [kg/m s]

$\mu_L$  = Viscosidad del líquido [kg/m s]

$\mu_G$  = Viscosidad del gas [kg/m s]

$C_I$  y  $C_{II}$  son constantes en función de las fracciones volumétricas locales y promedio, y de las velocidades locales y promedio; existiendo diversas simplificaciones para obtener el valor de  $\rho_{DF}$  y  $\mu_{DF}$ .

- Caso I. Flujo sin deslizamiento y homogéneo.

Bajo estas condiciones tenemos:

$$C_I = C_{II} = 1.0$$

$$\lambda_L = R_L$$

$$1 - \lambda_L = R_G$$

Las propiedades de la mezcla pueden ser obtenidas de las Ecs. ( 1 ) y ( 2 ) y son sin deslizamiento ( NS ).

$$\rho_{NS} = \rho_L \lambda + \rho_G ( 1 - \lambda ) \quad ( 8 )$$

$$\mu_{NS} = \mu_L \lambda + \mu_G ( 1 - \lambda ) \quad ( 9 )$$

Partiendo de que la mezcla bifásica sea tratada como un flujo monofásico equivalente, la caída de presión estará dada por:

$\Delta P$  = Caída de presión de flujo bifásico homogéneo [ Pa abs. ]

$$= f \frac{G_T^2}{2 \rho_{NS} D} L \quad ( 10 )$$

Donde:

$G_T$  = Flujo másico total por unidad de área por unidad de tiempo  $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}]$

$\rho_{NS}$  = Densidad de la mezcla homogénea  $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$D$  = Diámetro interno de la tubería  $[\text{m}]$

$L$  = Longitud de la tubería  $[\text{m}]$

$f$  = Factor de fricción del fluido homogéneo ( correlación del autor )

$$= 0.0014 + \frac{0.125}{(\text{Re}_{NS})^{0.32}} \quad ( 11 )$$

$$\text{Re}_{NS} = \frac{4 W_T}{\pi D \mu_{NS}} \quad ( 12 )$$

$W_T$  = Flujo másico total  $[\text{kg}/\text{s}]$

$D$  = Diámetro interno de la tubería  $[\text{m}]$

$\mu_{NS}$  = Viscosidad de la mezcla homogénea  $[\text{kg}/\text{m s}]$

- Caso II. Existe deslizamiento entre las fases, pero  $C_I$  y  $C_{II}$  permanecen iguales a 1.0.

Bajo estas condiciones, tenemos:

$$C_I = C_{II} = 1.0$$

$$\lambda_L \neq R_L$$

$$1 - \lambda_L \neq R_G = 1 - R_L$$

Requiriéndose de una correlación experimental para determinar los valores de  $R_L$  y  $R_G$ . El autor recomienda la utilización del método de Hughmark<sup>(1)</sup>, que consiste en lo siguiente.

Sea:

$$\delta = \frac{(\text{Re}_{NS})^{1/6} (\text{Fr})^{1/8}}{\lambda_L^{1/4}} \quad ( 13 )$$

Donde:

$\text{Re}_{NS}$  = Número de Reynolds considerando flujo homogéneo

(1) Hughmark, 1962. " Hold-up in Gas-Liquid Flow ". Chemical Engineering Progress. Vol. 58, No. 4.

Fr = Número de Froude

$$= \frac{V_{NS}^2}{g_c D} \quad (14)$$

$V_{NS}$  = Velocidad de mezcla aparente

$$= \frac{4 (Q_L + Q_G)}{\pi D^2} \quad (15)$$

$\lambda_L$  = Relación de flujo volumétrico líquido a flujo volumétrico total

Ahora, si:

$\delta < 10$

$$K = -0.16367 + 0.31037\delta - 0.3525\delta^2 + 0.001366\delta^3 \quad (16)$$

$\delta > 10$

$$K = 0.75545 + 0.003585\delta - 0.1436 \times 10^{-4}\delta^2 \quad (17)$$

Finalmente:

$$R_L = 1 - (1 - \lambda_L)K \quad (18)$$

Una vez obtenidos  $R_L$  y  $R_G$ , se determina el Número de Reynolds para el flujo bifásico.

$$Re_{DF} = \frac{4 W_T}{\pi D \mu_{NS}} \frac{\rho_L \lambda_L^2}{\rho_{NS} R_L} + \frac{\rho_G (1 - \lambda_L)^2}{\rho_{NS} R_G} \quad (19)$$

Donde:

$W_T$  = Gasto másico total [ kg/s ]

$D$  = Diámetro interno de la tubería [ m ]

$\mu_{NS}$  = Viscosidad sin deslizamiento [ kg/m s ]

$\rho_L$  = Densidad del líquido [ kg/m<sup>3</sup> ]

$\rho_{NS}$  = Densidad sin deslizamiento [ kg/m<sup>3</sup> ]

$\rho_G$  = Densidad del gas [ kg/m<sup>3</sup> ]

$\lambda_L$  = Relación de flujo volumétrico líquido a flujo volumétrico total

$R_L$  = Fracción volumétrica líquido

$R_G$  = Fracción volumétrica gas

Con  $Re_{DF}$  y  $\frac{\epsilon}{D}$  ( rugosidad relativa ), en el diagrama de Moody se encuentra un factor de fricción  $f$ .

Finalmente el factor de fricción de flujo bifásico se obtiene por medio de

la correlación experimental siguiente.

$$\alpha(\lambda) = f_{DF}/f$$

$$= 1 + \frac{-\ln \lambda}{1.281 - 0.478(-\ln \lambda) + 0.444(-\ln \lambda)^2 - 0.094(-\ln \lambda)^3 + 0.00843(-\ln \lambda)^4} \quad (20)$$

Por lo tanto:

$$f_{DF} = f \alpha(\lambda)$$

La caída de presión estará dada por:

$$\Delta P = \frac{L G_T^2 f_{DF} \left[ \frac{\rho_L \lambda^2}{\rho_{NS} R_L} + \frac{\rho_G (1-\lambda)^2}{\rho_{NS} R_G} \right]}{2 D \rho_{NS}} \quad (21)$$

Donde:

$G_T$  = Gasto másico total por unidad de área por unidad de tiempo [ kg/m<sup>2</sup> s ]

$f_{DF}$  = Factor de fricción de flujo bifásico

$D$  = Diámetro interno de la tubería [ m ]

$\rho_L$  = Densidad del líquido [ kg/m<sup>3</sup> ]

$\rho_G$  = Densidad del gas [ kg/m<sup>3</sup> ]

$\rho_{NS}$  = Densidad de la mezcla considerando flujo homogéneo [ kg/m<sup>3</sup> ]

$\lambda$  = Relación de flujo volumétrico líquido a flujo volumétrico total

$R_L$  = Fracción volumétrica líquido

$R_G$  = Fracción volumétrica gas

$L$  = Longitud de la tubería [ m ]

De los métodos anteriormente presentados se seleccionó uno, de acuerdo con los siguientes criterios:

- 1) Complejidad del cálculo.
- 2) Precisión.
- 3) Experiencias de aplicación en sistemas geotérmicos de tubería.

El método seleccionado fue el de Lockhart-Martinelli, que es muy sencillo de aplicar. En cuanto a los puntos ( 2 ) y ( 3 ) se reportan pruebas de aplicación de este método en los campos geotérmicos de Otake y Hatchobaru en Ja-

pon<sup>(1)</sup> y en Wairakei, Nueva Zelanda<sup>(2)</sup>, teniendo una gran aproximación entre los valores calculados con este método y los datos experimentales medidos, siendo ésto satisfactorio para el presente trabajo de tesis.

El procedimiento desarrollado para dimensionar las líneas conductoras de mezcla agua-vapor con base en el método de Lockhart-Martinelli, es como se muestra a continuación.

#### Datos Requeridos.

- $P$  = Presión de la tubería [bar abs.]  
 $h_T$  = Entalpía total de la mezcla [kJ/kg]  
 $T$  = Temperatura de saturación [°C]  
 $W_T$  = Flujo másico total [kg/s]  
 $L$  = Longitud lineal de la tubería [m]  
 $K$  = Coeficiente de pérdida de presión por accesorios  
 $v_f$  = Volumen específico de líquido saturado [m<sup>3</sup>/kg]  
 $v_g$  = Volumen específico de vapor saturado [m<sup>3</sup>/kg]  
 $\mu_L$  = Viscosidad dinámica del líquido [kg/m s]  
 $\mu_G$  = Viscosidad dinámica del vapor [kg/m s]  
 $h_f$  = Entalpía del líquido saturado [kJ/kg]  
 $h_{fg}$  = Entalpía de vaporización [kJ/kg]

---

(1) Y. Takahashi Et. Al. 1970. " An Experiment on Pipeline Transportation of Steam-Water Mixtures at Otake Geothermal Field ". U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources. Pisa 1970. V. 2 Part 1. p.p. 882-891.

(2) R. James 1970. " Flow of Steam-Water Mixtures Through a 12 inch Diameter Pipeline: Test Results ". U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources ". Pisa 1970. V. 2. Part 2. p.p. 1581-1587.

Recomendaciones.

1) Según R. James<sup>(1)</sup> la velocidad aparente de la mezcla debe de permanecer dentro de un rango de 24.38 a 30.48 m/s ( 80 a 100 ft/s ) para tener una moderada caída de presión y un cálculo con adecuada exactitud. Esta recomendación se aplica a mezclas con calidades mayores a 5%.

2) Para calidades bajas ( 0 a 5% ) la velocidad de la fase líquida debe de permanecer dentro de un rango de 1 a 5 m/s.

Cálculos.

Primeramente se requiere obtener la calidad de la mezcla.

$$x = \frac{h_T - h_f}{h_{fg}} \quad ( 22 )$$

Los flujos máxicos serán:

$$\begin{aligned} W_V &= \text{Flujo máxico de vapor [ kg/s ]} \\ &= W_T x \end{aligned} \quad ( 23 )$$

$$\begin{aligned} W_L &= \text{Flujo máxico de líquido [ kg/s ]} \\ &= W_T ( 1 - x ) \end{aligned} \quad ( 24 )$$

Los flujos volumétricos serán:

$$\begin{aligned} Q_V &= \text{Flujo volumétrico de vapor [ m}^3\text{/s ]} \\ &= \frac{W_V}{\rho_g} \end{aligned} \quad ( 25 )$$

$$\begin{aligned} Q_L &= \text{Flujo volumétrico de líquido [ m}^3\text{/s ]} \\ &= \frac{W_L}{\rho_f} \end{aligned} \quad ( 26 )$$

El flujo volumétrico total será:

$$\begin{aligned} Q_T &= \text{Flujo volumétrico total [ m}^3\text{/s ]} \\ &= Q_V + Q_L \end{aligned} \quad ( 27 )$$

---

(1) R. James 1970. " Flow of Steam-Water Mixtures Through a 12 inch Diameter Pipeline: Test Results ", U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources. Pisa 1970, Vol. 2. Part 2. p.p. 1581-1587.

La obtención del diámetro requerido para las condiciones de flujo viene dado en función de la velocidad recomendada y el flujo volumétrico total de la mezcla.

$D_i$  = Diámetro interno [ m ]

$$= \sqrt{\frac{4 Q_T}{\pi V_{\text{recom.}}}} \quad ( 28 )$$

Este diámetro se ajusta a un valor comercial  $D$  y se verifica que la velocidad real quede dentro del rango de velocidades recomendadas tanto para mezcla como para líquido.

$V_T$  = Velocidad real de la mezcla bifásica [ m/s ]

$$= \frac{4 Q_T}{\pi D^2} \quad ( 29 )$$

$V_L$  = Velocidad real del líquido [ m/s ]

$$= \frac{4 Q_L}{\pi D^2} \quad ( 30 )$$

La caída de presión en flujo bifásico viene dada por:

$$\left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{DF} = \phi^2 \left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_L \quad ( 2a )$$

Por lo que se requiere calcular primero la caída de presión, considerando únicamente flujo de líquido en la tubería.

$$\left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_L = \frac{V_L^2}{2v_f} \frac{f}{D} \quad ( 31 )$$

Donde:

$\left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_L$  = Gradiente de presión considerando flujo de líquido [ Pa abs./m ]

$V_L$  = Velocidad de la fase líquida [ m/s ]

$v_f$  = Volumen específico del líquido saturado [ m<sup>3</sup>/kg ]

$D$  = Diámetro interno de la tubería [ m ]

$f$  = Factor de fricción. ( Es una función del Número de Reynolds de la fase líquida y la rugosidad relativa de la tubería ).

$Re_L$  = Número de Reynolds de la fase líquida

$$= \frac{V_L D}{v_f \mu_L} \quad ( 32 )$$

$\frac{E}{D}$  = Rugosidad relativa de la tubería

$\epsilon$  = Rugosidad absoluta del material [ m ]

$D$  = Diámetro interno de la tubería [ m ]

El factor de fricción puede ser obtenido del Diagrama de Moody o con la solución numérica de la Ecuación de Colebrook:

La longitud equivalente de cualquier accesorio presente en la tubería se calcula de la siguiente manera:

$$L_{EQ} = \text{Longitud equivalente del accesorio [ m ]}$$

$$= K \frac{D}{f} \quad ( 33 )$$

Donde:

$K$  = Coeficiente de pérdida de presión por accesorio

$D$  = Diámetro interno de la tubería [ m ]

$f$  = Factor de fricción

Para la obtención de los parámetros de Martinelli (  $\chi$  y  $\phi^2$  ) se sigue el siguiente método:

$$\chi = \frac{ \left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_L }{ \left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_G } \quad ( 1 )$$

Sustituyendo la Ecuación de Darcy en esta ecuación para el flujo de líquido y el flujo de vapor, y simplificando se tiene:

$$= \left( \frac{\mu_L}{\mu_V} \right)^{0.1} \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.1} \left( \frac{v_f}{v_g} \right)^{0.5} \quad ( 34 )$$

La relación entre  $x$  y  $\phi^2$  dada por la gráfica de la figura 4.2, puede ser aproximada a la siguiente correlación.

$$\phi^2 = 1 + \frac{20}{\chi} \frac{1}{\chi^2} \quad ( 35 )$$

Esta relación se utiliza para el caso en que los dos flujos sean turbulentos, cosa que generalmente ocurre en mezclas agua-vapor debido a la ebullición, consecuencia de la caída de presión.

Finalmente la caída de presión total para el flujo bifásico será:

$$\Delta P = \text{Caída de presión para flujo bifásico [ Pa abs. ]}$$

$$= \left( \frac{v_L^2}{2v_f} \frac{f}{D} ( L + L_{EQ} ) \right) \phi^2 \quad ( 36 )$$



Donde:

$V_L$  = Velocidad del líquido [ m/s ]

$f$  = Factor de fricción

$v_f$  = Volumen específico del líquido saturado [ m<sup>3</sup>/kg ]

$D$  = Diámetro interno de la tubería [ m ]

$L$  = Longitud lineal de la tubería [ m ]

$L_{EQ}$  = Longitud equivalente de accesorios [ m ]

$\phi^2$  = Multiplicador de Martinelli

#### 4.2.3. Diseño Mecánico de la Tubería.

El diseño mecánico de la tubería, consiste en el cálculo del mínimo espesor requerido de pared de la tubería y en dar a dicha tubería la suficiente flexibilidad para absorber la expansión térmica.

Para efectos de esta tesis se consideró el Código ANSI B 31.1 Power Piping, el cual establece los mínimos requerimientos de diseño, materiales, fabricación, erección, prueba e inspección para sistemas de tubería de plantas generadoras de energía eléctrica, incluyendo plantas geotermoeléctricas.

##### 1) Cálculo del Espesor Requerido.

Para el cálculo del espesor de tubería requerido, el Código ANSI B 31.1 establece:

$$t_m = \frac{P D_o}{2(SE + Py)} + A \quad (1)$$

Donde:

$t_m$  = Espesor de pared mínimo requerido [ mm ]

$P$  = Presión interna de diseño [ kPa abs. ]

$D_o$  = Diámetro exterior de la tubería [ mm ]

$SE$  = Máximo esfuerzo permisible del material [ kPa abs. ]

( dado por el Apéndice A de dicho Código )

$A$  = Espesor adicional por corrosión y erosión [ mm ]

$y$  = Es un factor en función del material y la temperatura

( dado por la tabla 104.1.2 A de dicho Código )

Este espesor debe tomar en cuenta la tolerancia del fabricante, por lo tanto después de que el mínimo espesor de pared  $t_m$  es calculado por la ec. ( 1 ), debe ser incrementado para proveer una adecuada tolerancia de fabricación, resultando el espesor mínimo requerido igual a:

$$t_m = \frac{P D_o}{2(SE + Py)} + A \quad ( 2 )$$

Donde:

0.88 = Tolerancia de fabricación. ( Depende de la norma ASTM bajo la cual se fabrique la tubería ).

Una vez determinado este espesor, se seleccionará el inmediato superior de los espesores comerciales de tubería.

#### Recomendaciones.

1) La presión interna de diseño ( P ) es la presión de operación más un porcentaje de sobrepresión para prevenir estados transitorios en las tuberías.

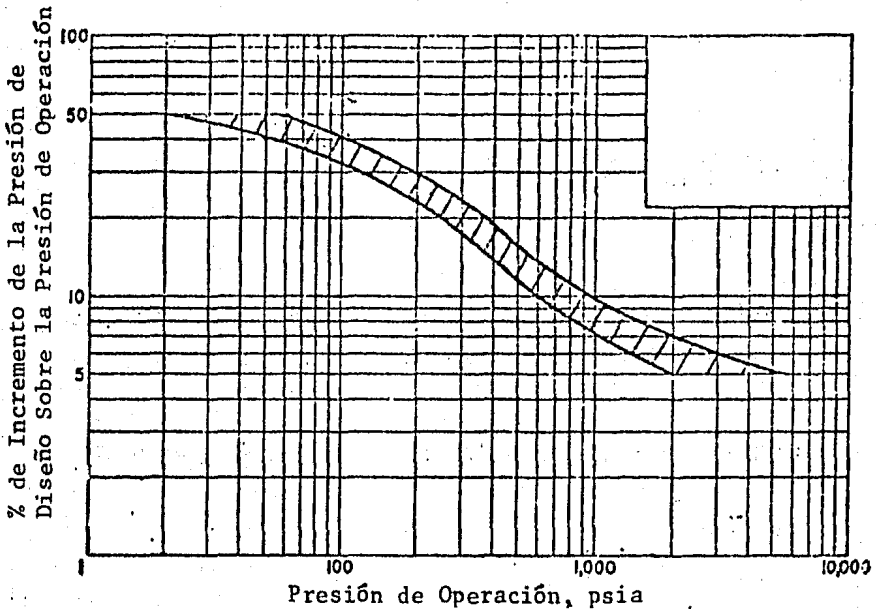


Fig. 4.3 Guía: Presión de operación VS incremento de la presión de diseño sobre la presión de operación.

Para estimar el porcentaje de sobrepresión se recomienda utilizar la gráfica de la figura 4.3, propuesta por E.E. Ludwig<sup>(1)</sup>.

2) Teniendo como base la experiencia en operación del campo geotérmico de Cerro Prieto, el espesor adicional por erosión y corrosión ( A ) será de 3.175 mm ( 1/8 plg. ).

2) Cálculo de la Flexibilidad de la Tubería.

Toda tubería expuesta a altas temperaturas sufrirá una expansión térmica, que provocará esfuerzos y reacciones que deben, de alguna manera, ser absorbidas para evitar daños a los equipos que interconecta y a la misma tubería.

En los sistemas geotérmicos, debido a las grandes longitudes que se tienen, el arreglo más utilizado es la curva de expansión, formada de tramos rectos de tubería y codos de radio largo de 30°.

Con cualquier arreglo, el máximo esfuerzo que se tenga en la tubería no deberá ser superior al calculado mediante la siguiente expansión ( según Código ANSI B 31.1 ):

$$S_{perm.} = 1.25 S_{frío} + 0.25 S_{caliente} \quad ( 3 )$$

Donde:

$S_{frío}$  = Esfuerzo permisible a la mínima temperatura de operación [ kPa abs. ]

$S_{caliente}$  = Esfuerzo permisible a la máxima temperatura de operación [ kPa abs. ]

Estos valores son tomados del Apéndice A del Código ANSI B 31.1.

---

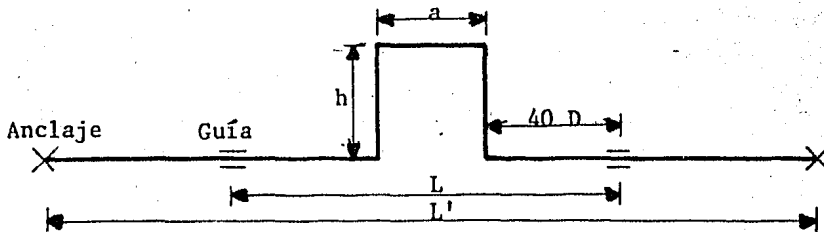
(1) Ludwig, E.E., " Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants ", Gulf Publishing Company, 1964, V. 1, p. 26.

Las curvas de expansión deben dimensionarse en forma adecuada para satisfacer el criterio anterior. Para ello se emplean diferentes procedimientos y aquí se presentan dos, uno aplicable a tuberías de 1 pulg. hasta 24 plg. de diámetro y otro para tuberías mayores a 24 pulg. de diámetro. Estos métodos son muy sencillos y tienen resultados satisfactorios para un trabajo preliminar como la presente tesis, requiriéndose métodos mucho más precisos y complejos para un correcto diseño de detalle.

A continuación se presentan los métodos junto con sus recomendaciones aplicables a cada uno.

a) Método Grinnell.

Sea:



Donde:

$L'$  = Distancia total entre anclajes [ ft ]

$L$  = Distancia total entre guías [ ft ]

$D$  = Diámetro de la tubería [ in ]

$a$  = Ancho de la curva de expansión [ ft ]

$h$  = Largo de la pierna de la curva de expansión [ ft ]

Recomendaciones.

1) Se colocarán guías para restringir los movimientos laterales aproximadamente a 40 diámetros de la pierna, como se puede ver en la figura 4.4.

2) Se recomienda la utilización de curvas de expansión de forma cuadrada (  $L/a = L/h$  ).

3) La distancia entre anclajes será de aproximadamente 150 m, ya que la configuración del terreno en Cerro Prieto es plana y permite este tipo de normalizaciones para facilitar los cálculos.

El procedimiento para obtener las dimensiones de las curvas de expansión fue tomado del libro " Piping Design and Engineering " <sup>(1)</sup>, está planteado en el sistema de unidades inglés, además requiere del uso de tablas de valores en dicho sistema, por lo que en esta parte de la tesis se trabajará en el sistema inglés.

Básicamente el método consiste en que teniendo conocida la distancia entre anclajes, se ajusta la distancia entre guías para que con una curva de forma cuadrada, con una mínima longitud de tubería adicional, se garantice que el esfuerzo en los codos sea menor al permisible; ya que en dichos codos es en donde se presentan los máximos esfuerzos.

Se tiene que:

$$k_b = \frac{S_{perm.} L^2}{c D L' i} \quad ( 4 )$$

Donde:

$k_b$  = Factor en función de las dimensiones geométricas de la curva de expansión ( L/a y L/h ).

$S_{perm}$  = Esfuerzo máximo permisible dado por la ec. ( 3 ) [ psi ]

L = Distancia entre guías [ ft ]

c = Factor de expansión térmica en función del tipo de material y la temperatura de operación, dado en la tabla 4.2 para acero de bajo contenido de carbono.

D = Diámetro externo de la tubería [ in ]

L' = Distancia total entre anclajes [ ft ]

i = Factor intensificador de esfuerzos en los codos, en función de las dimensiones geométricas del codo, dado en la tabla 4.3.

---

(1) Grinnell, Co. Inc., " Piping Design and Engineering ", 1963.

Suponiendo un valor inicial de la distancia entre guías ( L ) y considerando el esfuerzo permisible se obtiene un valor tentativo de  $k_b$ , que se ajusta al valor inmediato inferior de  $k_b$  dado por la tabla 4.1 y se procede a calcular el esfuerzo real en los codos.

$$S_b = \frac{k_b c D L'}{L^2} i \quad (5)$$

Donde:

$S_b$  = Esfuerzo flexionante en el codo [ psi ]

$k_b$  = Factor extraído de la tabla 4.1

$c$  = Factor expansión térmica de la tabla 4.2

$D$  = Diámetro externo de la tubería [ in ]

$L'$  = Distancia entre anclajes [ ft ]

$L$  = Distancia entre guías [ ft ]

$i$  = Factor intensificador de esfuerzos de la tabla 4.3

De la tabla 4.1 para el correspondiente valor de  $k_b$  se obtienen las relaciones geométricas  $L/a$  y  $L/h$  que darán la configuración final de la curva de expansión.

$$a = L \left( \frac{1}{L/a} \right) \quad (6)$$

Donde:

$a$  = Anchura de la curva de expansión [ ft ]

$L$  = Longitud entre guías [ ft ]

$L/a$  = Relación geométrica de la tabla 4.1 en función de  $k_b$

$$h = L \left( \frac{1}{L/h} \right) \quad (7)$$

Donde:

$h$  = Longitud de la pierna de la curva de expansión [ ft ]

$L$  = Longitud entre guías [ ft ]

$L/h$  = Relación geométrica de la tabla 4.1 en función de  $k_b$

b) Criterio ANSI B 31.1.

El Código ANSI B 31.1 en su parte 119.7.1 Métodos de Análisis, establece que un sistema de tuberías no requerirá de un análisis formal de flexibilidad,

$k_b$	RELACION L/a y L/h
18.00	2
37.40	3
64.00	4
97.80	5
138.80	6
187.10	7
242.70	8
305.00	9

Tabla 4.1

TEMPERATURA °F	FACTOR EXPANSION TERMICA C
150	98
200	160
250	228
300	294
350	365
400	436
450	510
500	584
550	664
600	743
650	827

Tabla 4.2

DIAMETRO Y CEDULA	FACTOR INTENSIFI- CADOR DE ESFUERZO
24" CED. 40	2.91
24" XS	3.50
24" CED. 30	3.33
22" CED. 20 STD	4.12
20" CED. 40	2.85
20" CED. 10	5.06
18" CED. 30	3.25
18" CED. 10	4.72
16" CED. 40	2.75
16" CED. STD	3.33
14" CED. 30 STD	3.85
14" CED. 40	2.75
12" CED. STD	2.86
12" CED. 20	3.60
10" CED. STD	2.48
8" CED. STD	2.44
6" CED. STD	2.25

Tabla 4.3

si no tiene más de dos anclajes, sin restricciones intermedias y si satisface el siguiente criterio; con las dimensiones dadas en el sistema inglés.

$$\frac{D Y}{(L - U)^2} \leq 0.03 \quad (8)$$

Donde:

D = Diámetro nominal del tubo [in]

Y = Resultante de movimientos a ser absorbidos por las líneas [in]

L = Largo desarrollado del eje longitudinal [ft]

U = Distancia recta entre anclajes [ft]

#### Recomendaciones.

1) Se colocarán guías para restringir los movimientos laterales, a 40 diámetros de la pierna.

2) La distancia entre anclajes será de aproximadamente 150 m.

Aplicando este criterio al dimensionamiento de curvas de expansión, se tiene:

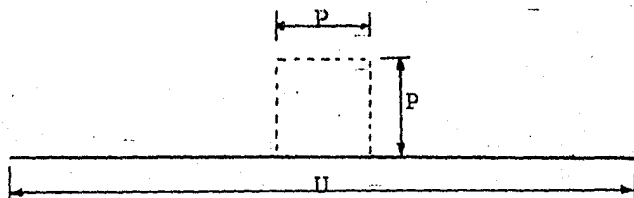


Fig. 4.5

Considerando una curva de expansión cuadrada, tenemos que:

U = Distancia recta entre anclajes [ft]

P = Pierna de la curva de expansión cuadrada [ft]

Y = Expansión térmica del tramo recto de tubería [in]

$$= B \times U/100 \quad (9)$$

B = Coeficiente de expansión térmica lineal ( in/100 ft ). Está en función del tipo de material y la temperatura de operación, y viene dado en el Apéndice B del Código ANSI B 31.1.

L = Longitud total de tubería incluyendo piernas [ft]

$$= U + 2P \quad (10)$$



Sustituyendo en la ec. ( 1 ) e igualando al caso crítico ( 0.03 ), tenemos:

$$\frac{D Y}{(U + 2P - U)^2} = 0.03$$

$$\frac{DY}{4 P^2} = 0.03$$

Despejando P:

$$P = \sqrt{\frac{DY}{0.12}} \quad ( 11 )$$

Este valor de P se ajusta a un número entero mayor y se verifica el criterio.

$$\frac{D Y}{4 ( P_{\text{real}} )^2} \leq 0.03 \quad ( 12 )$$

#### 4.2.4. Aislamiento Térmico.

Una vez determinado el diámetro de las tuberías se hacen algunas consideraciones sobre el espesor y tipo de aislamiento térmico a emplear. Para obtener el espesor del aislamiento por este método, se siguió el procedimiento mostrado a continuación.

#### Datos Requeridos.

$T_1$  = Temperatura de operación de la tubería [ °C ]

$T_2$  = Temperatura ambiente de diseño [ °C ]

$T_{os}$  = Temperatura superficial requerida del aislamiento [ °C ]

$D_1$  = Diámetro exterior de la tubería [ m ]

$k$  = Conductividad térmica del aislamiento [ kJ m/m<sup>2</sup> s °C ]

Con estos datos, considerando que la temperatura superficial de la tubería es igual a la del fluido y además que la transferencia de calor en el aislamiento es un proceso de conducción a través de un cilindro hueco disipándose después al medio ambiente por radiación y convección, se encuentra el espesor del aislamiento.

#### Recomendaciones.

1) Con base a la experiencia en el campo geotérmico de Cerro Prieto, se re-

comienda el uso de fibra mineral como material de aislamiento, presentándose como colchonetas ( Designación ASTM C 592.70 ) para diámetros de 0.3556 m ( 14" ) o mayores y en forma de media caña ( Designación ASTM C 547.67 ) para diámetros de 0.3048 m ( 12" ) y menores.

2) Para la determinación de la temperatura superficial requerida (  $T_{os}$  ) se sigue la norma PEMEX 2.616.01 " Aislamiento Térmico Para Alta Temperatura ", que establece que para una tubería operando en un rango de 101 a 300 °C debe tener una temperatura superficial máxima del aislamiento de 58 °C para protección del personal y conservación del calor.

3) La temperatura ambiente de diseño (  $T_1$  ) será de 13.5 °C, basada en las condiciones climáticas del campo geotérmico de Cerro Prieto.

El procedimiento para calcular el espesor requerido de aislamiento fue tomado del libro " Centrales Eléctricas " de F.T. Morse<sup>(1)</sup> y consiste de lo siguiente.

$$h = \text{Coeficiente de película [ kJ/s m}^2 \text{ }^\circ\text{C]} \\ = \frac{1.334645822}{D_o^{0.19} ( 228.3 - 1.51\theta )} \quad ( 1 )$$

Donde:

$$D_o = \text{Diámetro externo del aislamiento [ m]} \\ = D_1 + 2e \quad ( 2 )$$

$$D_1 = \text{Diámetro externo de la tubería [ m]}$$

$$e = \text{Espesor del aislamiento [ m]}$$

$$\theta = T_{os} - T_2 \quad ( 3 )$$

$$T_{os} = \text{Temperatura superficial requerida [ }^\circ\text{C]}$$

$$T_2 = \text{Temperatura ambiente de diseño [ }^\circ\text{C]}$$

$$R = \text{Resistencia térmica del aislamiento [ m}^2 \text{ s }^\circ\text{C/kJ]}$$

$$= \frac{1}{k} \left( \frac{D_o}{2} \ln \frac{D_o}{D_1} \right)$$

(1) F.T. Morse 1961. " Centrales Eléctricas ". Ed. C.E.C.S.A. 3a. Edición p.855.

Donde:

$D_1$  = Diámetro externo de la tubería [m]

$D_o$  = Diámetro externo del aislamiento [m]

$k$  = Conductividad térmica del aislamiento [ $\text{kJ m/m}^2 \text{s } ^\circ\text{C}$ ]

Esta conductividad térmica se encuentra dada por la gráfica de la figura 4.6 y se encuentra en función de la temperatura media entre la temperatura superficial requerida y la del fluido.

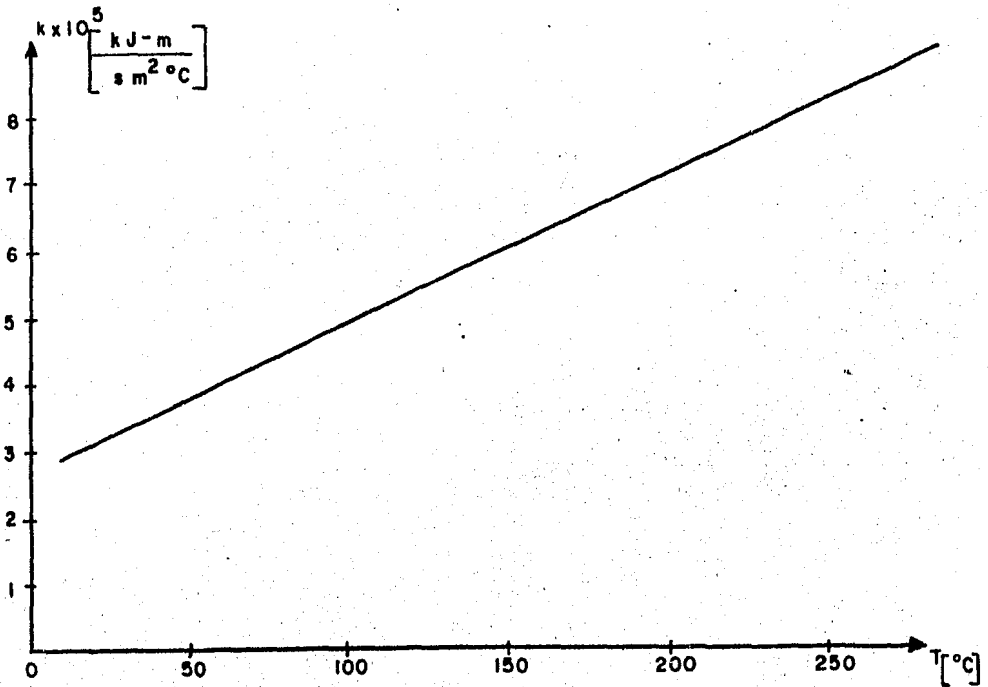


Fig. 4.6 Conductividad térmica de la lana mineral ( ASTM C 592 ).

$ER$  = Resistencia térmica total  $\text{m}^2 \text{s } ^\circ\text{C}/\text{kJ}$

$$= R + 1/h$$

Donde:

$R$  = Resistencia térmica del aislamiento  $\text{m}^2 \text{s } ^\circ\text{C}/\text{kJ}$

$h$  = Coeficiente de película

$$q = \text{Flujo de calor por unidad de área [kJ/s m}^2\text{]} \\ = \frac{1}{\Sigma R} ( T_1 - T_2 ) \quad ( 6 )$$

Donde:

$\Sigma R$  = Resistencia térmica total [ m<sup>2</sup> s °C/kJ ]

$T_1$  = Temperatura del fluido [ °C ]

$T_2$  = Temperatura ambiente [ °C ]

Finalmente la temperatura superficial del aislamiento será:

$$T_{oc} = \text{Temperatura superficial calculada [ °C ]} \\ = T_1 - qR \quad ( 7 )$$

Donde:

$T_1$  = Temperatura del fluido [ °C ]

$q$  = Flujo de calor por unidad de área [ kJ/s m<sup>2</sup> ]

$R$  = Resistencia térmica del aislamiento [ m<sup>2</sup> s °C/kJ ]

Al calcular  $T_{oc}$  se comprueba si es mayor a la temperatura superficial requerida, si es así, el espesor del aislamiento se incrementa en tramos de 0.0127 m ( 0.5" ) hasta garantizar que la temperatura superficial sea menor que la temperatura requerida. Esto se debe a que los espesores comerciales de aislamiento vienen en incrementos de 0.0127 m ( 0.5" ).

#### 4.2.5. Contenido de Sólidos Totales en el Vapor.

En los grandes sistemas conductores de vapor utilizados en plantas geotermoelectricas, normalmente se instalan piernas de escurrimiento con orificios de salida a todo lo largo de su trayectoria, desde el campo hasta la casa de máquinas, para remover el condensado y los sólidos disueltos en el mismo.

Partiendo de lo anterior y conociendo la eficiencia del separador y la de retiro de condensado, es posible determinar la concentración de químicos en el condensado asociados con el flujo de vapor después de un cierto número de puntos de extracción.

Para fines de la presente tesis se analizarán las líneas que llegan a la casa de máquinas para establecer el mínimo número de puntos de extracción que garanticen que el vapor que llega a la turbina tenga un contenido de sólidos totales menor a 1 parte por millón ( ppm ).

Partiendo del análisis del agua separada de Cerro Prieto II, el contenido de sólidos totales es de 30 170 ppm ( Ver Capítulo 3 ). Se requiere de un pequeño balance de materia y energía para la estimación de las cantidades de sólidos totales arrastrados en el vapor primario y secundario.

Los datos requeridos para realizar este balance son:

- $C_4$  = Contenido de sólidos totales en el agua separada [ ppm ]  
 $x_A$  = Calidad a la salida de los separadores de alta presión [ decimal ]  
 $x_B$  = Calidad a la salida de los separadores de baja presión [ decimal ]  
 $P_A$  = Presión del separador de alta [ bar abs. ]  
 $P_B$  = Presión del separador de baja [ bar abs. ]  
 $h_1$  = Entalpía de la mezcla [ kJ/kg ]  
 $h_2$  = Entalpía del líquido al separador de baja [ kJ/kg ]  
 $h_3$  = Entalpía del vapor alta presión [ kJ/kg ]  
 $h_4$  = Entalpía del líquido al silenciador [ kJ/kg ]  
 $h_5$  = Entalpía del vapor baja presión [ kJ/kg ]  
 $W_1$  = Flujo másico de mezcla [ kg/s ]  
 $W_2$  = Flujo másico de líquido del separador de baja [ kg/s ]  
 $W_3$  = Flujo másico de vapor alta presión [ kg/s ]  
 $W_4$  = Flujo másico de líquido al silenciador [ kg/s ]  
 $W_5$  = Flujo másico de vapor baja presión [ kg/s ]

Partiendo del balance de la figura 4.7, se tiene:

$$W_1 = W_2 + W_3 \quad ( 1 )$$

$$W_1 h_1 = W_2 h_2 + W_3 h_3 \quad ( 2 )$$

Por lo tanto:

$$W_3 = W_1 + \frac{h_1 - h_2}{h_3 - h_2} \quad ( 3 )$$

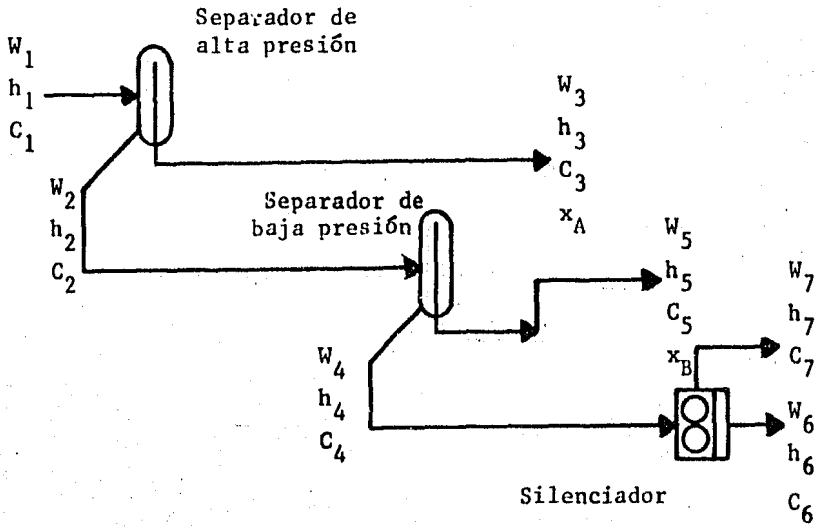


Fig. 4.7

$$W_2 = W_1 - W_3 \quad (4)$$

De la misma manera:

$$W_5 = W_2 + \frac{h_2 - h_4}{h_5 - h_4} \quad (5)$$

$$W_4 = W_2 - W_5 \quad (6)$$

Finalmente la concentración de sólidos será:

$$\begin{aligned} C_5 &= \text{Concentración de sólidos en la línea de vapor de baja presión [ppm]} \\ &= (1 - x_B) C_4 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} C_2 &= \text{Concentración de sólidos en la línea de líquido al separador de baja [ppm]} \\ &= \frac{\text{Rel } A/V}{(\text{Rel } A/V + 1)} C_4 \end{aligned} \quad (8)$$

Donde:

$$\text{Rel } A/V = W_4/W_5 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} C_3 &= \text{Concentración de sólidos en la línea de vapor de alta presión [ppm]} \\ &= (1 - x_A) C_2 \end{aligned} \quad (10)$$

$$C_1 = \text{Concentración de sólidos en la línea de mezcla [ppm]}$$

$$= \frac{\text{Rel } A/V}{\text{Rel } A/V + 1} C_2 \quad (11)$$

Donde:

$$\text{Rel } A/V = W_2/W_1$$

Partiendo de estas concentraciones iniciales y con el cálculo de la pérdida de calor, pérdida de presión y la eficiencia de extracción del orificio de control, se determinará el número de puntos de drenado requeridos para tener una concentración de sólidos totales menor a 1 ppm.

El siguiente procedimiento fue propuesto por R. James<sup>(1)</sup> y adoptado en el campo geotérmico de Cerro Prieto con éxito.

#### Datos Requeridos.

- ppm<sub>1</sub> = Concentración de químicos inicial [ ppm ]  
 h<sub>T1</sub> = Entalpfa total inicial [ kJ/kg ]  
 W<sub>T1</sub> = Flujo másico total [ kg/s ]  
 x<sub>1</sub> = Calidad del vapor inicial [ decimal ]  
 h<sub>f2</sub> = Entalpfa del líquido en el punto final [ kJ/kg ]  
 h<sub>fg2</sub> = Entalpfa de vaporización en el punto final [ kJ/kg ]  
 Q/L = Pérdida de calor por unidad de longitud [ kJ/s m ]  
 L = Distancia entre puntos de drenado [ m ]  
 η = Eficiencia de la extracción [ decimal ]

#### Recomendaciones.

- 1) Utilizar una distancia entre puntos de drenado de 100 m.
- 2) La eficiencia de extracción del orificio ( η ) será de 0.85.

(1) James, R., " Control Orifices Replace Steam Traps on Overland Transmission Pipelines ", Second United Nations Symposium on The Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, California, USA, 1975, pp. 1699-1702.

$$\begin{aligned}
 W_{f1} &= \text{Flujo másico de agua en el punto ( 1 ) [ kg/s]} \\
 &= W_T ( 1 - x_1 ) \quad ( 13 )
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= \text{Calor perdido entre puntos de extracción [ kJ/s]} \\
 &= ( Q/L ) \times L \quad ( 14 )
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{T2} &= \text{Entalpía total en el punto ( 2 ) [ kJ/kg]} \\
 &= h_{T1} - \Delta h \quad ( 15 )
 \end{aligned}$$

Donde:

$$\Delta h = Q/W_{T1} \quad ( 16 )$$

$$\begin{aligned}
 x_2 &= \text{Calidad en el punto ( 2 ) [ decimal]} \\
 &= \frac{h_{T2} - h_{f2}}{h_{fg2}} \quad ( 17 )
 \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 W_{f2} &= \text{Flujo másico de agua en el punto ( 2 ) [ kg/s]} \\
 &= W_{T1} ( 1 - x_2 ) \quad ( 18 )
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 AE &= \text{Agua extraída en el punto ( 2 ) [ kg/s]} \\
 &= \eta \times W_{f2} \quad ( 19 )
 \end{aligned}$$

La concentración final será:

$$\text{ppm}_2 = \text{ppm}_1 \frac{W_{f1}}{W_{f2}} \quad ( 20 )$$

Calculando las condiciones iniciales del siguiente tramo, se tiene:

$$\begin{aligned}
 W_{f2'} &= \text{Flujo de agua remanente en la tubería después de la extracción [ kg/s]} \\
 &= W_{f2} ( 1 - \eta ) \quad ( 21 )
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_{T2'} &= \text{Flujo másico total después de la extracción [ kg/s]} \\
 &= W_{T1} - AE \quad ( 22 )
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_{2'} &= \text{Calidad después de la extracción [ decimal]} \\
 &= 1 - \frac{W_{f2'}}{W_{T2'}} \quad ( 23 )
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{T2'} &= \text{Entalpía total después de la extracción [ kJ/kg]} \\
 &= h_{f2} + x_{2'} h_{fg2} \quad ( 24 )
 \end{aligned}$$

Como las características finales de un tramo son las iniciales para el siguiente tramo, el procedimiento de cálculo se repite hasta garantizar que el



contenido de sólidos totales ( ppm<sub>2</sub> ) sea menor a 1 ppm.

#### 4.3. DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS DE SEPARACION.

Para el dimensionamiento de los equipos de separación se siguió la metodología presentada en el " Manual de Diseño de Equipo Geotérmico de Superficie " desarrollado en el Instituto de Investigaciones Eléctricas; con base en las relaciones presentadas por Bangma<sup>(1)</sup>, modificadas según la experiencia adquirida en el desarrollo del campo geotérmico de Cerro Prieto.

En la figura 4.8 se muestra un separador tipo Webre con sus dimensiones características.

Los datos necesarios para dicho dimensionamiento, siguiendo el procedimiento mencionado previamente son:

$W_T$  = Flujo total de mezcla [kg/s]

$h_T$  = Entalpía de la mezcla a la entrada del equipo [kJ/kg]

$P$  = Presión de separación [bar abs.]

A la presión de separación se obtienen las siguientes propiedades de la fase líquida y gaseosa.

$h_f$  = Entalpía del líquido saturado [kJ/kg]

$h_g$  = Entalpía del vapor saturado [kJ/kg]

$v_f$  = Volumen específico del líquido saturado [m<sup>3</sup>/kg]

$v_g$  = Volumen específico del vapor saturado [m<sup>3</sup>/kg]

$\mu_L$  = Viscosidad dinámica del líquido [kg/m s]

$\mu_g$  = Viscosidad dinámica del vapor [kg/m s]

$\bar{\nu}$  = Tensión superficial del líquido [N/m]

---

(1) P. Bangma. " The Development and Performance of a Steam-Water Separator for use on Geothermal Bores ". U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources. V.3. Rome 1961.

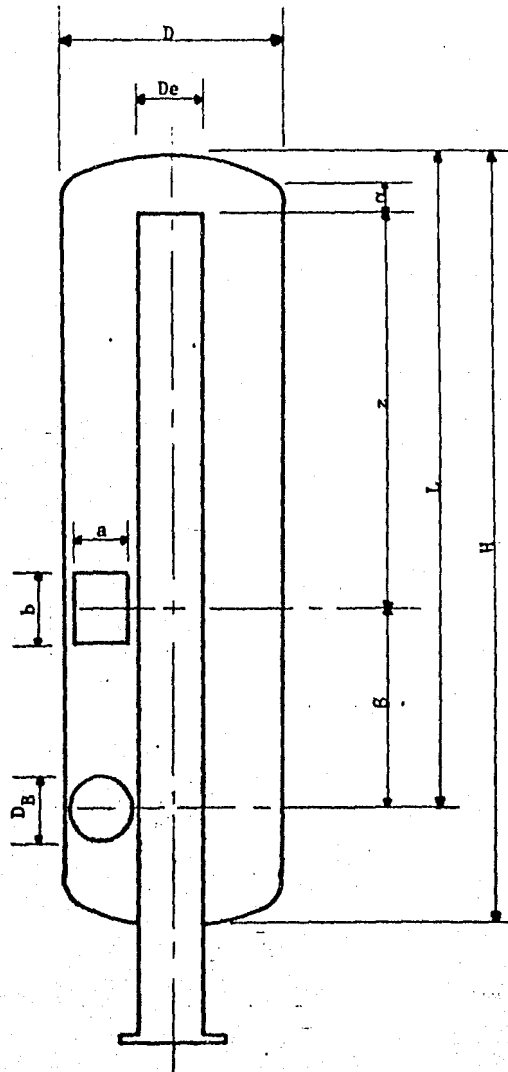


Fig. 4.8 Separador Tipo Wehre.

Con estos datos se calculan los flujos volumétricos y máxicos del agua y vapor, así como las dimensiones geométricas del separador, mediante las siguientes relaciones.

$x$  = Calidad del vapor dentro del separador [ decimal ]

$$= \frac{h_T - h_f}{h_g - h_f} \quad (1)$$

$W_v$  = Flujo máxico de vapor [ kg/s ]

$$= W_T x \quad (2)$$

$W_L$  = Flujo máxico de líquido [ kg/s ]

$$= W_T (1 - x) \quad (3)$$

$Q_v$  = Flujo volumétrico de vapor [ m<sup>3</sup>/s ]

$$= v_g W_v \quad (4)$$

$Q_L$  = Flujo volumétrico de líquido [ m<sup>3</sup>/s ]

$$= v_f W_L \quad (5)$$

$A$  = Area de la tubería de entrada [ m<sup>2</sup> ]

$$= \frac{Q_v}{V_{recom}} \quad (6)$$

Donde:

$V_{recom}$  = Velocidad recomendada

$D_o$  = Diámetro interno de la tubería de entrada [ m ]

$$= \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (7)$$

Este diámetro se ajusta a un valor comercial  $D_T$  y se verifica que la velocidad real quede dentro del rango de velocidades recomendadas.

$V_{real}$  = Velocidad real del vapor a la entrada al separador [ m/s ]

$$= \frac{4 Q_v}{\pi D_T^2} \quad (8)$$

Conocido  $D_T$  se dimensiona el separador con base a las siguientes relaciones:

$D_T$  = Diámetro de entrada al equipo [ m ]

$D$  = Diámetro interno del equipo [ m ]

$$= 3.3 D_T$$

$D_E$  = Diámetro de la salida de vapor [ m ]

$$= D_T$$

$D_B$  = Diámetro de la salida de agua separada [ m ]

$$= D_T$$

$\alpha$  = Distancia entre el tubo de salida de vapor y el cordón de soldadura de la tapa con el cuerpo del separador [ m ]

$$= \pm 0.15 D_T \text{ ( si está por encima del cordón es negativa, de no ser así es positiva ) .}$$

$\beta$  = Distancia entre la entrada de mezcla y la salida de líquido separado [ m ]

$$= 3.5 D_T$$

$Z$  = Distancia entre la entrada de mezcla y la salida de vapor [ m ]

$$= 5.5 D_T$$

$A_c$  = Altura de la cabeza toriesférica [ m ]

$$= 0.169 D$$

$L_I$  = Altura tanque integral [ m ]

$$= \frac{\beta + Z}{3}$$

Las recomendaciones a observar en el diseño son las siguientes:

- 1) La velocidad del vapor en la tubería de entrada de mezcla no deberá exceder de 45 m/s, recomendándose un rango de 25 a 40 m/s.
- 2) La velocidad de ascenso del vapor dentro del equipo no deberá exceder de 4.5 m/s, recomendándose un rango de 2.5 a 4 m/s.
- 3) Se recomienda la utilización de tapas toriesféricas.

#### Método Para Predecir la Calidad del Vapor a la Salida de un Separador Webre.

La calidad del vapor es por definición la relación entre la masa de vapor y la masa de la mezcla líquido-vapor. Mientras que la eficiencia de separación es la relación entre la masa de líquido menos la masa de líquido arrastrado y la masa de líquido, es decir:

$$\text{Calidad} = \frac{W_v}{W_v + W_L} \quad (9)$$

$$\eta_{\text{sep}} = \frac{W_L - W_a}{W_L} \quad (10)$$

Donde:

$W_v$  = Flujo másico de vapor [kg/s]

$W_L$  = Flujo másico de líquido [kg/s]

$W_a$  = Flujo másico de líquido que no es separado y consecuentemente es arrastrado por la corriente gaseosa [kg/s]

Dejando la calidad en función de  $\eta_{\text{sep}}$ ,  $W_v$  y  $W_L$ , se tiene:

$$\text{Calidad} = \frac{W_v/W_L}{1 - \eta_{\text{sep}} + W_v/W_L} \quad (11)$$

Por otra parte, la eficiencia de separación se puede obtener por medio del producto de otras dos eficiencias, una considera el balance de fuerzas que actúa sobre una gota de líquido y la otra considera la fuerza de arrastre del flujo de vapor sobre la película de líquido en las paredes del separador.

Por lo tanto:

$$\eta_{\text{sep}} = \eta_m \eta_A \quad (12)$$

Donde:

$\eta_m$  = Eficiencia mecánica

$\eta_A$  = Eficiencia por arrastre

Para estimar la calidad final del vapor a la salida de un separador Webre, se deben calcular  $\eta_m$  y  $\eta_A$ , mediante el procedimiento que se muestra a continuación.

- Eficiencia mecánica ( $\eta_m$ ).

$$\eta_m = 1 - e^{(-2(c\psi)^{1/2}(n+1))} \quad (13)$$

Donde:

$$c = \text{Número adimensional en función del área de entrada al equipo}$$

$$= \frac{8 k_c D^2}{A B} \quad (13.1)$$

A y B = Lados de la entrada rectangular [m]

D = Diámetro interno del equipo [m]

$k_c$  = Número adimensional que depende de las proporciones relativas entre algunas dimensiones del equipo y es una indicación del volumen efectivo que tiene un diseño.

$$= \frac{t_{res} Q_v}{D^3} \quad (13.2)$$

$Q_v$  = Flujo volumétrico de vapor [ $m^3/s$ ]

D = Diámetro interno del equipo [m]

$t_{res}$  = Tiempo de residencia del vapor en el separador, el cual es función del flujo volumétrico y del volumen disponible dentro del equipo [s]

$$t_{res} = \frac{V_S + V_H/2}{Q_v} \quad (13.3)$$

Donde:

$$V_S = \pi/4 (D^2 - D_E^2) Z \quad [m^3] \quad (13.4)$$

$$V_H = \frac{\pi D^2}{4} \alpha + \frac{\pi D^2}{4} FALDON + 0.081D^3 - \frac{\pi D_E^2}{4} (\alpha + 0.169D + FALDON) \quad [m^3] \quad (13.5)$$

n = Exponente del vórtice [adimensional]

$$= 1 - (1 - 0.6689D^{0.14}) \left( \frac{T_s + 273.2}{294.3} \right)^{0.3} \quad (13.6)$$

D = Diámetro interno del equipo [m]

$T_s$  = Temperatura de saturación correspondiente a la presión de separación [°C]

$\psi$  = Constante adimensional en función del diámetro de gota, exponente de vórtice y la velocidad del vapor

$$= \frac{d_p^2 V_1 (n+1)}{18 \mu_v D v_f} \quad (13.7)$$

$V_1$  = Velocidad de entrada de vapor al equipo [m/s]

n = Exponente del vórtice

$\mu_v$  = Viscosidad dinámica del vapor [kg/m s]

$D$  = Diámetro interno del equipo [m]

$v_f$  = Volumen específico del líquido saturado a presión de separación [ $m^3/kg$ ]

$d_p$  = Diámetro de gota dentro del equipo [m]

El diámetro de gota se calcula de la siguiente forma:

$$d_p = \frac{66.2898}{V^a} \sqrt{\frac{V}{\sigma}} + B(1357.346) \left(\frac{\mu_L}{\sigma}\right)^{0.225} \left(\frac{Q_L}{Q_V}\right)^{0.5507} V^e \quad (13.8)$$

Donde:

$V$  = Velocidad del vapor en la tubería de entrada [m/s]

$\sigma$  = Tensión superficial del líquido [N/m]

$\rho$  = Densidad del líquido [ $gr/cm^3$ ]

$\mu$  = Viscosidad dinámica del líquido [poise]

$Q_L$  = Flujo volumétrico del líquido [ $m^3/s$ ]

$Q_V$  = Flujo volumétrico del vapor [ $m^3/s$ ]

Las constantes  $a$ ,  $B$  y  $e$  se obtienen a partir del patrón de flujo presente en la tubería de entrada, de acuerdo al criterio Baker. Los parámetros Baker son:

$$B_x = 2.1064 \left(\frac{W_L}{W_V}\right) \left(\frac{v_f^{2/3}}{(v_f v_g)^{1/2}}\right) \left(\frac{\mu_L^{1/3}}{\sigma}\right) \quad (14)$$

$$B_y = 25511.811 \left(\frac{4 W_V}{\pi D_T^2}\right) v_f v_g \quad (15)$$

Donde:

$W_L$  = Flujo másico de líquido [kg/s]

$W_V$  = Flujo másico de vapor [kg/s]

$v_f$  = Volumen específico del líquido [ $m^3/kg$ ]

$v_g$  = Volumen específico del vapor [ $m^3/kg$ ]

$\mu_L$  = Viscosidad dinámica del líquido [kg/m s]

$\sigma$  = Tensión superficial del líquido [N/m]

$D_T$  = Diámetro de entrada al equipo [m]

Con los valores obtenidos de los parámetros  $B_x$  y  $B_y$ , se entra a la gráfica de la figura 4.9 y se obtiene el patrón de flujo.

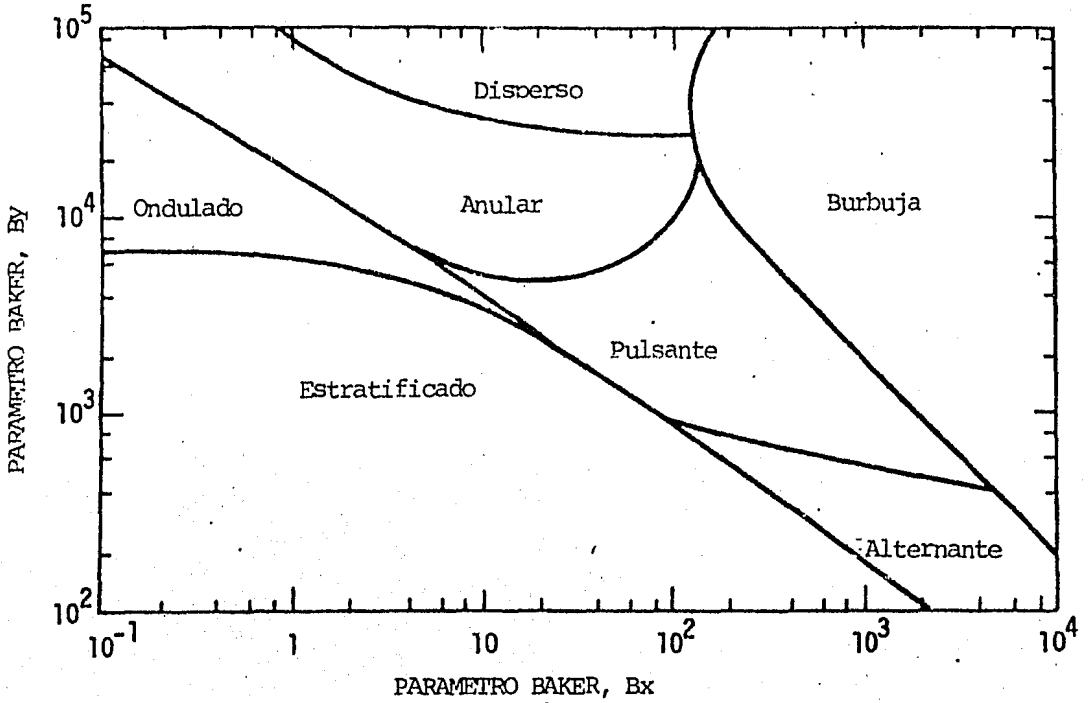


Fig. 4.9 Carta Baker

Una vez determinado el tipo de flujo, los valores de las constantes  $a$ ,  $B$  y  $e$  se encuentran a partir de la tabla 4.4.

- Eficiencia por arrastre ( $\eta_A$ ).

$$\eta_A = 10^j \quad (16)$$

Donde:

$$j = -3.383996 \times 10^{14} \left( \frac{4 Q_v}{E (D^2 - D_E^2)} \right)^{13.9241} \quad (16.1)$$

$Q_v$  = Flujo volumétrico de vapor [m<sup>3</sup>/s]

$D$  = Diámetro interno del equipo [m]

$D_E$  = Diámetro de salida del vapor [m]



PATRON DE FLUJO	a	B	e
Estratificado ( liso y ondulado )	0.5436	$\frac{94.9042}{(x)^{0.4538}}$	0.0253
Anular	0.8069	$\frac{198.7749}{(x)^{0.2648}}$	- 0.2188
Disperso y Burbuja	0.8069	$\frac{140.8346}{(x)^{0.5747}}$	- 0.2188
Intermitente ( plug - slug )	0.5436	$\frac{37.3618}{(x)^{6.8792 \cdot 10^5}}$	0.0253
x = Calidad			

Tabla 4.4

Cálculo de la Caída de Presión.

La caída de presión a través del equipo de separación, se determina con la siguiente relación:

$$\Delta P = \frac{8 D_T^2 V_1}{D_E^2 v_g} \quad ( 17 )$$

Donde:

$D_T$  = Diámetro de entrada al equipo [ m ]

$V_1$  = Velocidad del vapor entrando al equipo [ m/s ]

$D_E$  = Diámetro de salida del vapor [ m ]

$v_g$  = Volumen específico del vapor [ m<sup>3</sup>/kg ]

Diseño Mecánico del Separador.

Una vez que se tienen las dimensiones del separador, se diseña mecánicamente de acuerdo a la Sección VIII División I del Código ASME; para lo cual se parte de los siguientes datos.

$P$  = Presión de operación [ bar abs.]

$T$  = Temperatura de operación [ °C]

$P_d$  = Presión de diseño [ bar abs.]

$T_d$  = Temperatura de diseño [ °C]

$D$  = Diámetro del recipiente [ m]

Materiales de construcción

La obtención del espesor del recipiente como el de las tapas está en función de la presión de diseño, diámetro del recipiente, esfuerzo permisible y eficiencia de la soldadura.

El material de construcción recomendado es ASTM A 285 Gr C y según el Código ASME tabla UCS-23 el esfuerzo permisible para este material entre el rango de temperatura - 20 <  $T$  < 650 °F es:

$$S = 95\,137.2 \text{ kPa}$$

Por otro lado, la eficiencia de la soldadura según el Código ASME tabla UW-12 recomienda:

$E = 1$  para las tapas

$E = 0.85$  para el recipiente

En base a lo anterior, para el cálculo del espesor del recipiente se tiene:

$$t_r = \frac{P_d D_i}{2SE - 1.2P_d} \quad (1)$$

Donde:

$P_d$  = Presión de diseño [ bar abs.]

$D_i$  = Diámetro interior del recipiente [ m ]

$S$  = Esfuerzo permisible [ bar ]

$E$  = Eficiencia de la soldadura

Para el cálculo del espesor de la tapa, se tiene:

$$t_r = \frac{0.708 P_d D_i}{SE - 0.1P_d} \quad (\text{Tapa toriesférica}) \quad (2)$$

Donde:

$P_d$  = Presión de diseño [ bar abs. ]

$D_i$  = Diámetro interior del recipiente [ m ]

$S$  = Esfuerzo permisible [ bar ]

$E$  = Eficiencia de la soldadura

Después de calcular  $t_r$  se tomará en cuenta la corrosión ( recomendándose 3.175 mm ), y en la parte central del cilindro donde se localiza la entrada de mezcla se deberá tomar en cuenta la erosión ( recomendándose 6.35 mm ). Siempre se seleccionará el espesor nominal con una dimensión fácil de conseguir en el mercado.

En base a lo anterior, para el cálculo del espesor nominal del recipiente se tiene:

$$t_{rn} = t_r + 3.175 \times 10^3 \quad (\text{Corrosión}) \quad (3)$$

$$t_{rn} = t_r + 6.35 \times 10^3 \quad (\text{Erosión}) \quad (4)$$

Finalmente, para el cálculo del peso del recipiente se tiene:

$$W_r = \Gamma_m \frac{\pi}{4} ( D_e^2 - D_i^2 ) L \quad (5)$$

Donde:

$\Gamma_m$  = Peso específico del material = 7850 kg/m<sup>3</sup> (1)

$D_e$  = Diámetro exterior del recipiente [ m ]

$D_i$  = Diámetro interior del recipiente [ m ]

$L$  = Altura de la placa considerada [ m ]

(1) Acero al carbono. Manual SELMEC, Sociedad Electromecánica, S.A., 1979, p. 24.

Para el cálculo del peso de las tapas toriesféricas, se tiene:

$$S_c = K_o ( D_i + t_r )^2 \quad ( 6 )$$

$$W_T = 2 S_c \Gamma_m t_r \quad ( 7 )$$

Donde:

$S_c$  = Area superficial externa [ m<sup>2</sup> ]

$D_i$  = Diámetro interior de la tapa [ m ]

$t_r$  = Espesor nominal [ m ]

$\Gamma_m$  = Peso específico [ kg/m<sup>3</sup> ]

$K_o$  = 1.12 ( sistema internacional )

Por lo que, el peso total del recipiente sin tomar en cuenta el peso del tubo central es:

$$W = W_{rasi} + W_{rac} + W_T \quad ( 8 )$$

Donde:

$W_{rasi}$  = Peso del anillo superior e inferior [ kg ]

$W_{rac}$  = Peso del anillo central [ kg ]

$W_T$  = Peso de las tapas [ kg ]

## PLANTEAMIENTO Y ANALISIS DE ALTERNATIVAS DE CONDUCCION DE FLUIDO

### 5.1 INTRODUCCION.

En este Capítulo se plantean cuatro alternativas de conducción de fluido geotérmico desde los pozos hasta la casa de máquinas, para alimentar a una turbina de presión mixta.

En la figura 5.1 se pueden observar, de una manera elemental, los límites de dimensionamiento.

La base de que se partió para dimensionar las diferentes alternativas de los sistemas de conducción, fue la de garantizar en la turbina los flujos y presiones necesarios para una generación eléctrica de 110 MW; manteniendo la presión en el cabezal del pozo y el flujo de mezcla dentro de un valor preestablecido.

Las características requeridas por la turbina para generar 110 MW son:

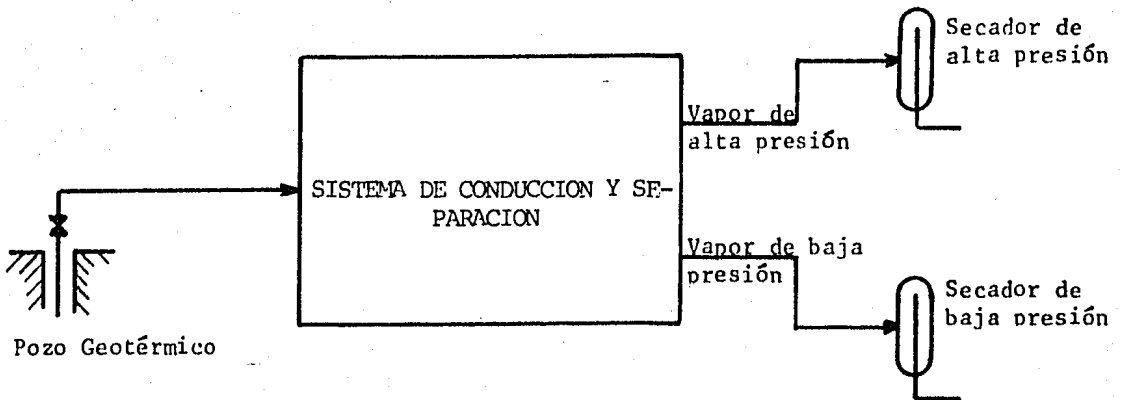


Fig. 5.1 Límites del dimensionamiento.

Flujo de vapor de alta presión = 637 134 kg/h

Presión del vapor de alta presión = 11.27 bar abs.

Flujo de vapor de baja presión = 108 950 kg/h

Presión del vapor de baja presión = 3.62 bar abs.

Para el dimensionamiento del sistema de conducción se tomó como base el campo geotérmico de Cerro Prieto II, que cuenta con 25 pozos para el suministro de vapor a dos unidades de 110 MW cada una.

Todos los pozos se consideran iguales y con las mismas características de producción, que son:

Presión del cabezal del pozo = 49.03 bar abs.

Flujo total de mezcla del pozo = 250 000 kg/h

Entalpía total de la mezcla = 1 423.24 kJ/kg

Para determinar que cantidad de pozos geotérmicos ( ya que todos los pozos son iguales ) requería cada unidad para generar 110 MW, se desarrolló un balance térmico para calcular la capacidad de generación eléctrica de un pozo.

Se consideró el flujo de un sólo pozo y las condiciones de operación ( presiones ) de los equipos de separación aproximadas a las que se tendrán al funcionar el sistema completo. Para calcular el balance se siguió un procedimiento similar al presentado en el Capítulo 2, en el análisis del ciclo con dos etapas de evaporación-separación y turbina de presión mixta.

En la figura 5.2 se muestra dicho balance y se observa que son necesarios 10 pozos para generar 110 MW por unidad, dejando cinco pozos de respaldo para las dos unidades.

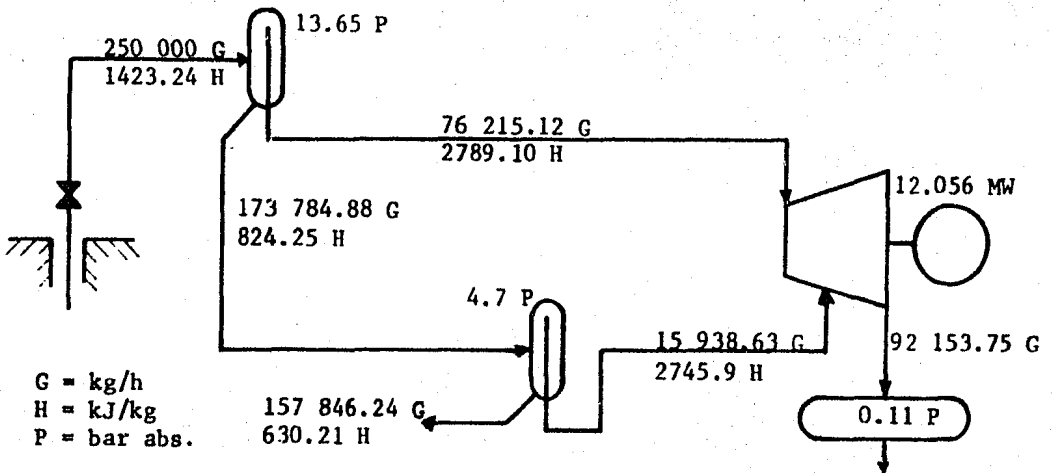


Fig. 5.2

Los secadores se dimensionaron en base al flujo y a las condiciones requeridas por la turbina ( son iguales para todas las alternativas ), diseñándose dos equipos del 50% de capacidad por cada unidad turbogeneradora.

Los diagramas de los secadores y sus características de proceso se muestran

en las figuras 5.3 y 5.4 para alta y baja presión respectivamente.

Para el trazo de las tuberías en las diferentes alternativas, se partió de la localización conocida de la casa de máquinas y de cada uno de los 25 pozos dentro del campo geotérmico; desarrollando los arreglos de tubería con el criterio de tener el menor recorrido de la misma y un arreglo simple.

Para la estimación del costo aproximado de cada alternativa, se partió de los siguientes costos unitarios:

- Costo del kilogramo de tubería ASTM A 285 Gr C = \$ 142.60
- Costo del metro cuadrado de aislamiento de lana mineral de 0.0254 m ( 1 plg. ) de espesor ASTM C 592 = \$ 735.68
- Costo del metro cuadrado de aislamiento de lana mineral de 0.0127 m ( 0.5 plg. ) de espesor ASTM C 592 = \$ 537.48

El costo de mantenimiento de los equipos de separación se estimó en función del área a limpiar ( dentro del separador ), considerando una cuadrilla de cuatro trabajadores ganando el salario mínimo y un técnico especializado ganando dos salarios mínimos; además, se realizará la limpieza dos veces por año.

No se incluye el costo de los pozos y del equipo de la casa de máquinas, por ser igual en todas las alternativas.

Para hacer la evaluación económica de cada una de las alternativas se consideraron los siguientes datos:

Vida útil del sistema = 30 años

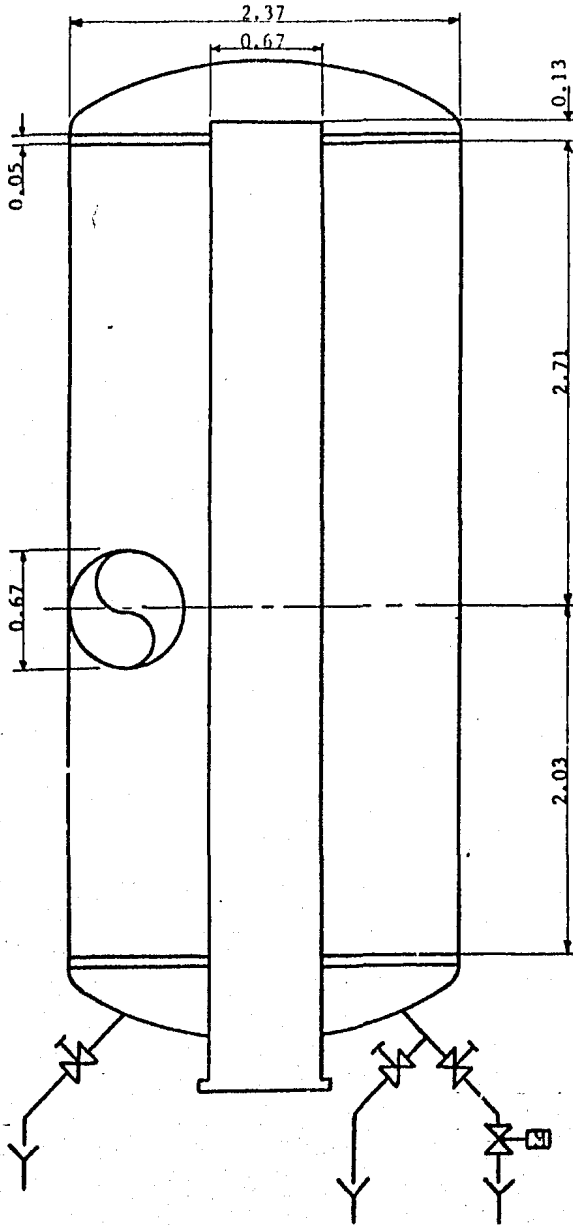
Vida útil de tuberías de vapor = 30 años

Vida útil de tuberías de líquido separado y mezcla = 15 años

Vida útil del equipo de separación = 30 años

Tasa de descuento = 10%





**CARACTERISTICAS.**

W = 318 567 kg/h

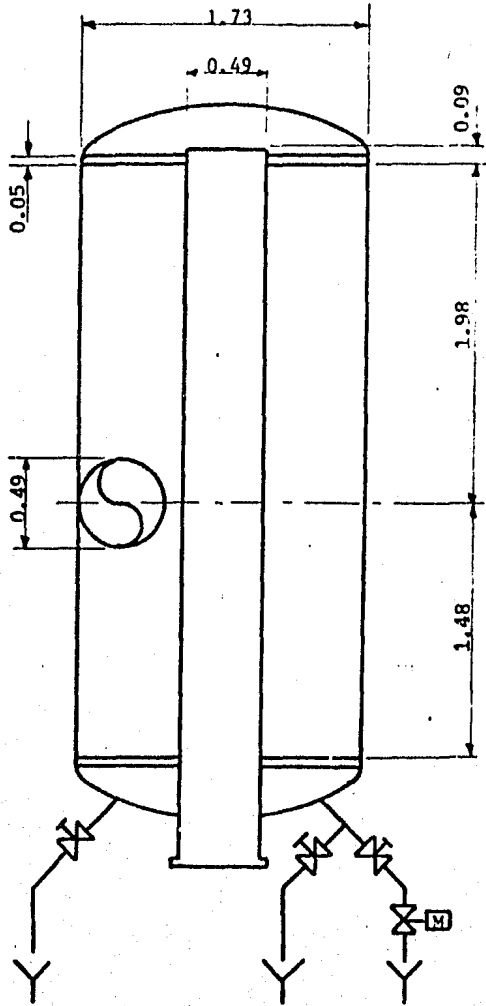
P = 11.27 bar abs.

x = 99.9977%

Esc. 1:30

Acot. m

Fig. 5.3 Secador de alta presión.



CARACTERISTICAS.  
W = 54 475 kg/h  
P = 3.62 bar abs.  
x = 99.9978%

Esc. 1:30  
Acot. m

Fig. 5.4 Secador de baja presión.

## 5.2 ALTERNATIVA " A ".

En esta alternativa, los dos pasos de evaporación-separación se realizan a pie de pozo, enviándose el vapor de alta y baja presión de cada pozo por medio de dos colectores hasta la casa de máquinas. En la figura 5.5 se puede observar en forma simplificada este método de conducción.

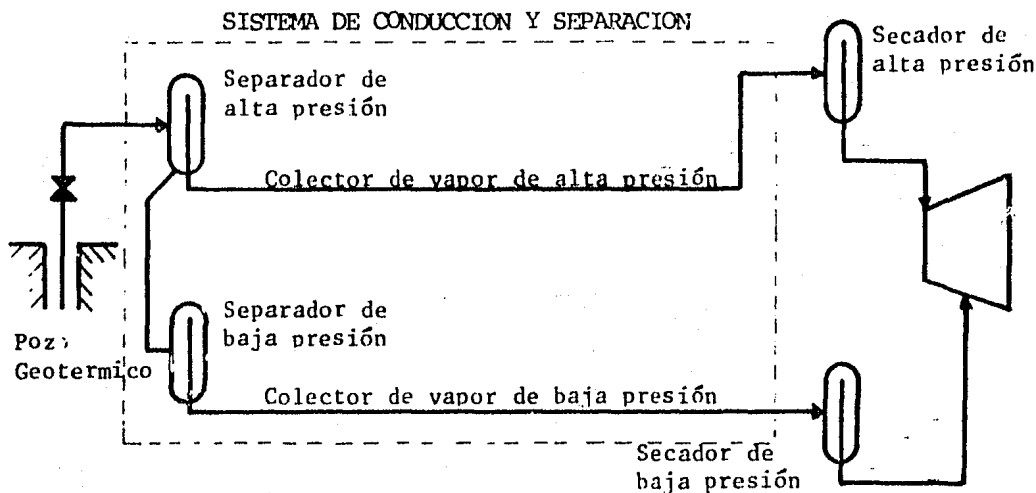


Fig. 5.5 Diagrama básico Alternativa " A ".

Para el dimensionamiento de los colectores de vapor se partió de las condiciones requeridas por la turbina en la salida de los secadores ( presión y gasto másico ), a partir de ahí y con el procedimiento presentado en el Capítulo 4 ( Dimensionamiento de líneas conductoras de una fase ) se dimensionaron los colectores de alta y baja presión para cada unidad, hasta llegar a cada uno de los pozos; ajustando la presión de los separadores en alta y baja presión instalados en cada uno de los pozos geotérmicos.

A continuación se presenta, para esta alternativa, el balance térmico de todo el sistema operando al 100% de carga. Este balance es sólo indicativo, debido a que los separadores de cada uno de los pozos operan a diferente presión y las relaciones de vapor y líquido separado variarán de pozo a pozo ( Ver figura 5.6 ).

En operación algunos separadores producirán más vapor y otros menos, alcanzando todo el sistema un estado de equilibrio en cuanto a flujos mássicos y presiones. Existen a la entrada de la turbina dispositivos que regulan las condiciones del vapor para garantizar una generación eléctrica de 110 MW y en casos de cargas diferentes, operará la estación reguladora de presión descargando parte del vapor a la atmósfera.

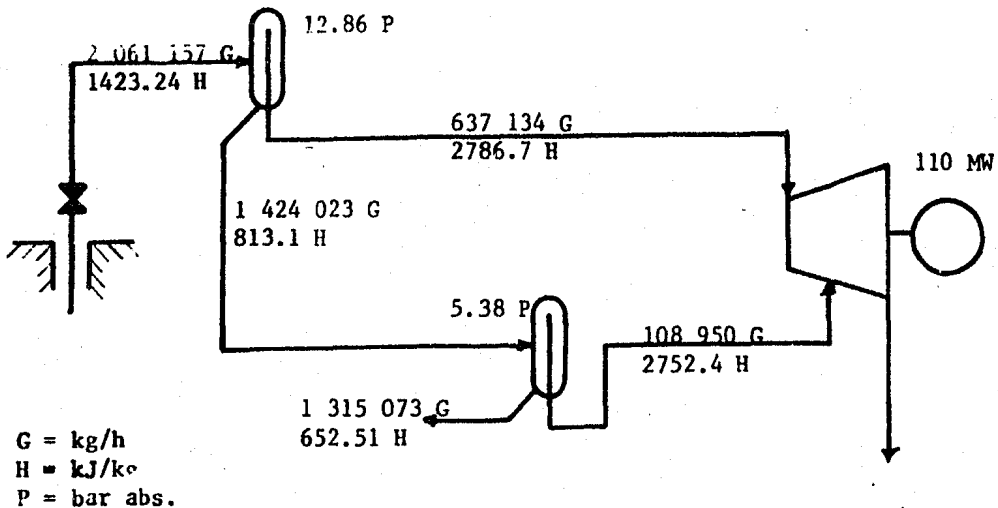
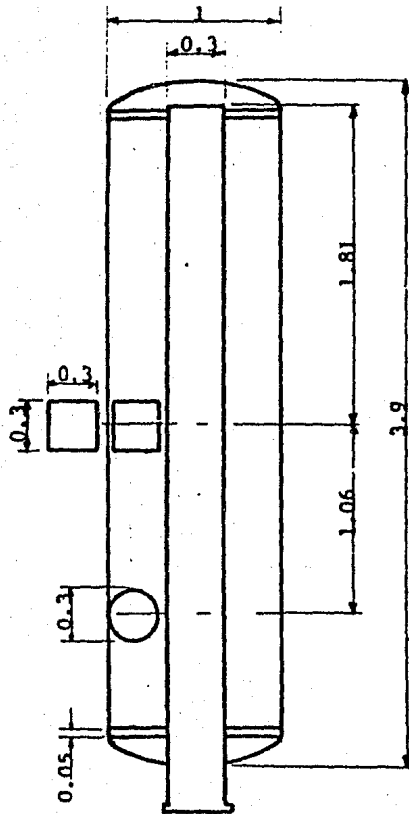


Fig. 5.6

### Equipo de Separación.

Debido a que cada pozo geotérmico cuenta con dos equipos de separación ( alta y baja presión ), se contará con 25 equipos de separación de alta presión y 25 equipos de separación de baja presión, tomándose en cuenta dentro de estos equipos a aquellos que se encuentran en los pozos de reserva.

Con el procedimiento presentado en el Capítulo 4 y tomando como base de diseño a los separadores que operan a menor presión ( los que producen más vapor ), se dimensionaron los separadores tipo que se emplearán en todos los pozos. En las figuras 5.7 y 5.8 se muestran las dimensiones de los equipos de separación de alta y baja presión respectivamente, junto con sus características de diseño.



CARACTERISTICAS.

W = 250 000 kg/h

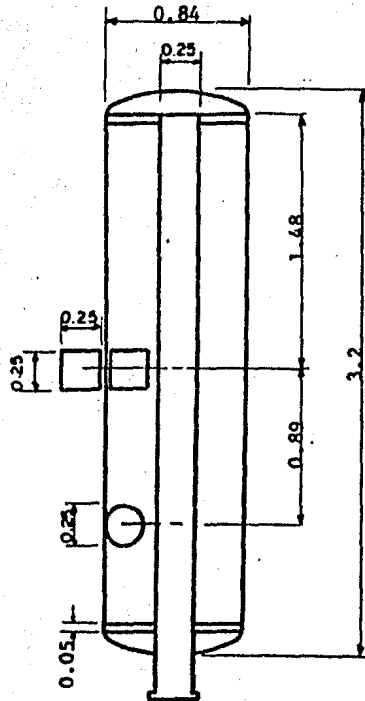
P = 13.14 bar abs.

x = 99.9956%

Esc. 1:30

Acot. m

Fig. 5.7 Separador de alta presión.

**CARACTERISTICAS.**

W = 143 384.6 kg/h

P = 4.38 bar abs.

x = 99.9679%

Esc. 1:30

Acot. m

Fig. 5.8 Separador de baja presión.

En el Plano No. 1 se puede observar el arreglo geométrico de esta alternativa ( las curvas de expansión sólo aparecen indicadas ).

La lista de líneas que aparece a continuación de dicho plano contiene las características de la tubería ( diámetro, espesor, etc. ), así como la del aislamiento calculado, además de las condiciones de proceso ( presión, temperatura y flujo ).

#### Costo del Equipo de Separación.

En función de la cantidad y peso del equipo de separación, el costo total de dichos equipos será:

- 25 equipos de separación de alta presión = \$ 51'684,960.00
- 25 equipos de separación de baja presión = \$ 15'807,300.00

En función del área a limpiar se estimó el costo anual de mantenimiento del equipo de separación.

- Costo anual de mantenimiento = \$ 1'431,400.00

#### Costo de la Tubería.

Evaluando el costo de la tubería en función de su peso, tenemos:

- Costo de tubería de alta presión = \$ 385'231,230.00
- Costo de tubería de baja presión = \$ 146'245,860.00

Con el procedimiento presentado en el Capítulo 4 se determinó el espesor del aislamiento requerido para cada línea. El costo total del aislamiento en función del área a cubrir será:

- Costo total del aislamiento = \$ 27'624,570.00

Flujo de Efectivo.

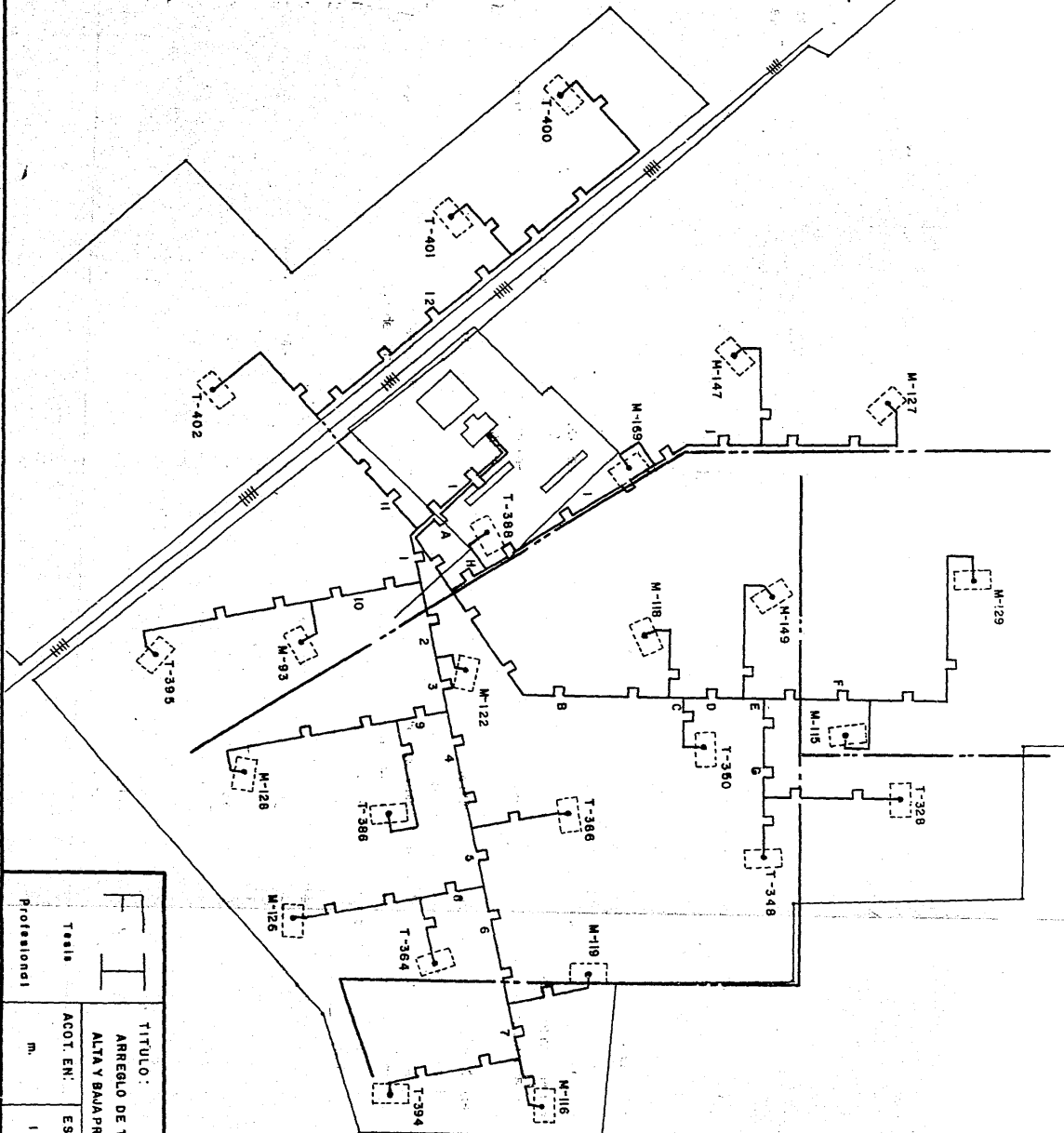
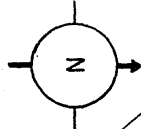
El costo inicial de esta alternativa será:

Costo de la tubería	\$ 531'477,090.00
Costo de aislamiento	27'624,570.00
Costo de equipo de separación	<u>67'492,260.00</u>
	\$ 626'593,920.00
Costo de mantenimiento anual	\$ 1'431,400.00

El valor presente de esta alternativa, considerando los parámetros económicos mencionados al principio de este Capítulo es:


V.P. = \$ 640'087,610.00







Tesis Profesional	TITULO: ARREGLO DE TUBERIA, VAPOR DE ALTA Y BAJA PRESION ALTERNATIVA A	ESCALA: 1:10 000	ELABORO: G.A.S. L.A.T.R.	FECHA: JUNIO - 84
				PLANO NO: 1

Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)		
							Tipo	Espesor (pulgadas)			
1	42	0.75	--	12.20	188.72	700,847.4	IM-C592	1	618		
2	38	0.75	--	12.35	189.29	573,420.6	IM-C592	1	245		
3	36	0.75	40	12.47	189.73	509,707.2	IM-C592	1	178		
4	30	0.625	30	12.80	190.93	382,280.4	IM-C592	1	372		
5	28	0.625	30	12.96	191.51	318,567.0	IM-C592	1	184		
6	22	0.5	30 (XS)	13.33	192.80	191,140.2	IM-C592	1	378		
7	18	0.438	30	13.56	193.58	127,426.8	IM-C592	1	184		
8	18	0.438	30	13.23	192.46	127,426.8	IM-C592	1	195		
9	18	0.438	30	12.71	190.59	127,426.8	IM-C592	1	158		
10	18	0.438	30	12.67	190.45	127,426.8	IM-C592	1	341		
11	22	0.5	30 (XS)	12.61	190.24	191,140.2	IM-C592	1	466		
12	18	0.438	30	13.58	193.67	127,426.8	IM-C592	1	674		
			<b>Tesis</b> <b>Profesional</b>						<b>Descripción:</b> Tuberías de vapor de alta presión. Unidad 1. Alternativa " A ".		Hoja No. 1 de 3

Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
M-116	12	0.375	STD	13.87	194.64	63,713.4	IM-C592	1	164	
T-394	12	0.375	STD	14.26	195.93	63,713.4	IM-C592	1	376	
M-119	12	0.375	STD	13.82	194.47	63,713.4	IM-C592	1	251	
T-364	12	0.375	STD	13.58	193.66	63,713.4	IM-C592	1	177	
M-126	12	0.375	STD	13.86	194.62	63,713.4	IM-C592	1	342	
T-366	12	0.375	STD	13.30	192.69	63,713.4	IM-C592	1	252	
T-386	12	0.375	STD	13.48	193.33	63,713.4	IM-C592	1	377	
M-128	12	0.375	STD	13.74	194.18	63,713.4	IM-C592	1	524	
M-122	12	0.375	STD	12.60	190.21	63,713.4	IM-C592	1	100	
M-93	12	0.375	STD	12.89	191.24	63,713.4	IM-C592	1	90	
T-395	12	0.375	STD	13.66	193.93	63,713.4	IM-C592	1	504	
T-402	12	0.375	STD	13.27	192.60	63,713.4	IM-C592	1	327	
			Descripción: Tuberías de vapor de alta presión, Unidad 1. Alternativa " A ".						Hoja No. 2 de 3	
Tesis Profesional										

Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)		
							Tipo	Espesor (pulgadas)			
T-401	12	0.375	STD	13.97	194.98	63,713.4	IM-C592	1	199		
T-400	12	0.375	STD	14.90	198.00	63,713.4	IM-C592	1	721		
		Tesis Profesional							Descripción: Tuberías de vapor de alta presión. Unidad 1. Alternativa " A ".		Hoja No. 3 de 3


Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
1	30	0.375	STD	3.96	143.29	119,845.0	IM-C592	0.5	618	
2	26	0.375	STD	4.04	144.01	98,055.0	IM-C592	0.5	245	
3	26	0.375	STD	4.09	144.43	87,160.0	IM-C592	0.5	178	
4	22	0.375	STD	4.21	145.51	65,370.0	IM-C592	0.5	372	
5	20	0.250	10	4.28	146.08	54,475.0	IM-C592	0.5	184	
6	16	0.250	10	4.42	147.29	32,685.0	IM-C592	0.5	378	
7	12	0.250	20	4.53	148.14	21,790.0	IM-C592	0.5	184	
8	12	0.250	20	4.40	147.10	21,790.0	IM-C592	0.5	195	
9	12	0.250	20	4.19	145.33	21,790.0	IM-C592	0.5	158	
10	12	0.250	20	4.18	145.21	21,790.0	IM-C592	0.5	341	
11	16	0.250	10	4.12	144.71	32,685.0	IM-C592	0.5	466	
12	12	0.250	20	4.57	148.52	21,790.0	IM-C592	0.5	674	
			<b>Tesis Profesional</b> <b>Descripcion:</b> Tuberias de vapor de baja presión. Unidad 1. Alternativa " A ".						<b>Hoja No. 1</b> <b>de 3</b>	

Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
M-116	8	0.250	20	4.72	149.66	10,895.0	IM-C592	0.5	164	
T-394	8	0.250	20	4.95	151.49	10,895.0	IM-C592	0.5	376	
M-119	8	0.250	20	4.72	149.71	10,895.0	IM-C592	0.5	251	
T-364	8	0.250	20	4.61	148.82	10,895.0	IM-C592	0.5	177	
M-126	8	0.250	20	4.79	150.24	10,895.0	IM-C592	0.5	342	
T-366	8	0.250	20	4.52	148.11	10,895.0	IM-C592	0.5	252	
T-386	8	0.250	20	4.68	149.36	10,895.0	IM-C592	0.5	377	
M-128	8	0.250	20	4.84	150.62	10,895.0	IM-C592	0.5	524	
M-122	8	0.250	20	4.20	145.37	10,895.0	IM-C592	0.5	100	
M-93	8	0.250	20	4.31	146.36	10,895.0	IM-C592	0.5	90	
T-395	8	0.250	20	4.80	150.33	10,895.0	IM-C592	0.5	504	
T-402	8	0.250	20	4.54	148.27	10,895.0	IM-C592	0.5	327	
<b>F I</b> Tests Profesional			Descripción: Tuberías de vapor de baja presión. Unidad 1. Alternativa " A ".						Hoja No. 2 de. 3	


Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
T-401	8	0.250	20	4.80	150.34	10,895.0	IM-C592	0.5	199	
T-400	8	0.250	20	5.38	154.67	10,895.0	IM-C592	0.5	721	
<b>FI</b> Tesis Profesional			Descripción: Tuberías de vapor de baja presión. Unidad 1. Alternativa " A ".						Hoja No. 3 de 3	

Numero de Línea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
A	40	0.750	--	12.26	188.96	637,134.0	IM-C592	1	658	
B	34	0.625	30	12.79	190.90	445,993.8	IM-C592	1	850	
C	30	0.625	30	12.83	191.04	382,280.4	IM-C592	1	46	
D	28	0.625	30	12.99	191.61	318,567.0	IM-C592	1	180	
E	24	0.500	XS	13.06	191.85	254,853.6	IM-C592	1	75	
F	18	0.438	30	13.47	193.26	127,426.8	IM-C592	1	326	
G	18	0.438	30	13.48	193.30	127,426.8	IM-C592	1	312	
H	26	0.500	20 (XS)	12.83	191.04	254,853.6	IM-C592	1	719	
I	18	0.438	30	13.23	192.45	127,426.8	IM-C592	1	335	
M-129	12	0.375	STD	14.78	197.64	63,713.4	IM-C592	1	708	
M-115	12	0.375	STD	13.87	194.63	63,713.4	IM-C592	1	190	
T-328	12	0.375	STD	14.15	195.58	63,713.4	IM-C592	1	364	
<b>FI</b> Tesis Profesional			Descripción: Tuberías de vapor de alta presión. Unidad 2. Alternativa " A ".						Hoja No. 1 de. 2	



Numero de Lineo	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
T-348	12	0.375	STD	13.76	194.27	63,713.4	IM-C592	1	155	
M-149	12	0.375	STD	13.72	194.12	63,713.4	IM-C592	1	377	
T-350	12	0.375	STD	13.22	192.41	63,713.4	IM-C592	1	182	
M-118	12	0.375	STD	13.28	192.62	63,713.4	IM-C592	1	324	
T-388	12	0.375	STD	12.69	190.52	63,713.4	IM-C592	1	120	
M-169	12	0.375	STD	13.17	192.25	63,713.4	IM-C592	1	150	
M-147	12	0.375	STD	13.84	194.55	63,713.4	IM-C592	1	307	
M-127	12	0.375	STD	14.13	195.49	63,713.4	IM-C592	1	474	
 <b>Tesis Profesional</b>			<b>Descripcion:</b> Tuberías de vapor de alta presión. Unidad 2. Alternativa " A ".						<b>Hoja No. 2</b> de 2	

Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
A	28	0.375	STD	4.01	143.69	108,950.0	IM-C592	0.5	658	
B	24	0.375	20 (STD)	4.25	145.85	76,265.0	IM-C592	0.5	850	
C	22	0.375	20 (STD)	4.27	145.96	65,370.0	IM-C592	0.5	46	
D	20	0.250	10	4.33	146.52	54,475.0	IM-C592	0.5	180	
E	18	0.250	10	4.35	146.70	43,580.0	IM-C592	0.5	75	
F	12	0.250	20	4.54	148.21	21,790.0	IM-C592	0.5	326	
G	12	0.250	20	4.54	148.22	21,790.0	IM-C592	0.5	312	
H	18	0.250	10	4.29	146.21	43,580.0	IM-C592	0.5	719	
I	12	0.250	20	4.48	147.73	21,790.0	IM-C592	0.5	335	
M-129	8	0.250	20	5.36	154.46	10,895.0	IM-C592	0.5	708	
M-115	8	0.250	20	4.78	150.17	10,895.0	IM-C592	0.5	190	
T-328	8	0.250	20	4.95	151.44	10,895.0	IM-C592	0.5	364	
			<b>Descripción:</b> Tuberías de vapor de baja presión. Unidad 2. Alternativa " A ".						Hoja No. 1 de. 2	

Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
T-348	8	0.250	20	4.71	149.61	10,895.0	IM-C592	0.5	155	
M-149	8	0.250	20	4.79	150.22	10,895.0	IM-C592	0.5	377	
T-350	8	0.250	20	4.50	147.93	10,895.0	IM-C592	0.5	182	
M-118	8	0.250	20	4.55	148.34	10,895.0	IM-C592	0.5	324	
T-388	8	0.250	20	4.25	145.81	10,895.0	IM-C592	0.5	120	
M-169	8	0.250	20	4.50	147.95	10,895.0	IM-C592	0.5	150	
M-147	8	0.250	20	4.85	150.70	10,895.0	IM-C592	0.5	307	
M-127	8	0.250	20	5.02	152.04	10,895.0	IM-C592	0.5	474	
			<b>Descripcion:</b> Tuberías de vapor de baja presión. Unidad 2. Alternativa " A ".						Hoja No. 2 de. 2	

### 5.3 ALTERNATIVA " B ".

En esta alternativa, el primer paso de evaporación-separación se realiza a pie de cada pozo, enviándose el vapor de alta presión por medio de un colector hacia los secadores en la casa de máquinas.

Por otra parte el agua separada se envía mediante un colector hacia la planta de evaporación, localizada a 450 m de la casa de máquinas, para que ahí se lleve a cabo el segundo paso de evaporación-separación, enviándose el vapor de baja presión por medio de una línea hacia la casa de máquinas. En la figura 5.9 se puede observar en forma simplificada este método de conducción.

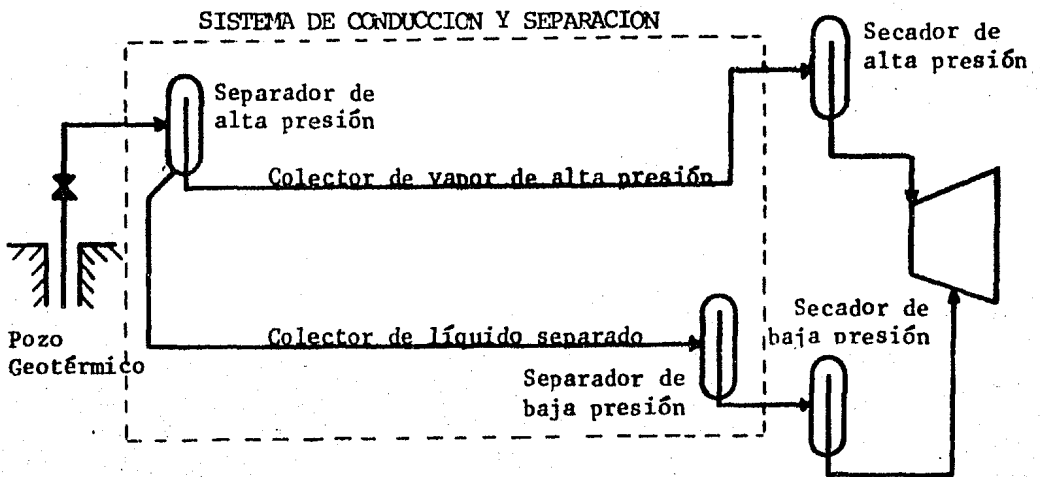


Fig. 5.9 Diagrama básico Alternativa " B ".

#### Procedimiento de Dimensionamiento.

Se dimensionó un colector de vapor de alta presión para cada unidad y dos colectores de líquido separado hacia la planta de evaporación.

Para el dimensionamiento de los colectores de vapor de alta presión se siguió el mismo procedimiento de la Alternativa " A ", partiendo de las condiciones de los secadores ( presión y gasto másico ) y dimensionando del

colector hacia los pozos con el procedimiento presentado en el Capítulo 4, ajustando la presión de los separadores de alta presión ubicados en cada uno de los pozos.

Para la localización de la planta de evaporación dentro del campo geotérmico, se siguió la metodología presentada en el Capítulo 4; dando como resultado una distancia de 450 m a partir de la casa de máquinas. Esta distancia garantiza que el contenido de sólidos totales estimado en el vapor sea menor a 1 ppm.

Para evitar el tener que tirar vapor sobrante del segundo paso de evaporación-separación ( debido a una presión de separación baja ), se obtuvo la presión de operación de la planta de evaporación en base al balance térmico mostrado en la figura 5.10.

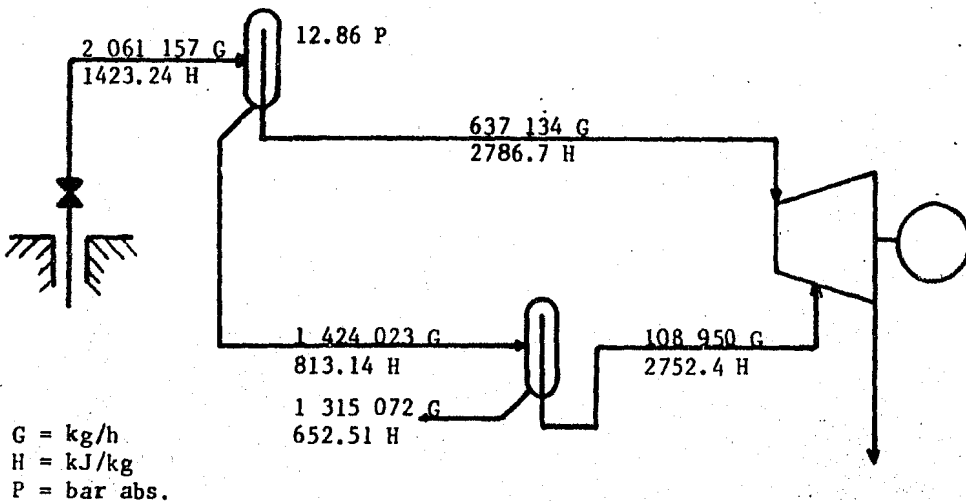


Fig. 5.10.

Al igual que en la Alternativa " A " este es un balance indicativo, ya que en cada separador de alta presión se tendrán diferentes relaciones vapor-agua separada; tomando todo el sistema su equilibrio.

La línea de vapor de baja presión, que envía el vapor de la planta de evaporación a los secadores de humedad, se dimensionó en base a la diferencial

de presión existente entre ellos, respetando las velocidades recomendadas para la conducción de vapor presentadas en el Capítulo 4.

Para el dimensionamiento del colector de líquido separado, se consideró flujo isoentálpico; por lo tanto la tubería se dimensionó en base a flujo bifásico utilizando el procedimiento presentado en el Capítulo 4. La entalpía utilizada para este procedimiento fue la entalpía resultante de la mezcla de todos los flujos de líquido separado de los equipos de separación de alta presión a los que está conectado el colector.

El colector de líquido separado se dimensionó en base a una diferencial de presión disponible entre la entrada a la planta de evaporación y la de salida de agua separada del primer paso de evaporación-separación en cada pozo, tratando de garantizar las velocidades recomendadas para la conducción de mezcla.

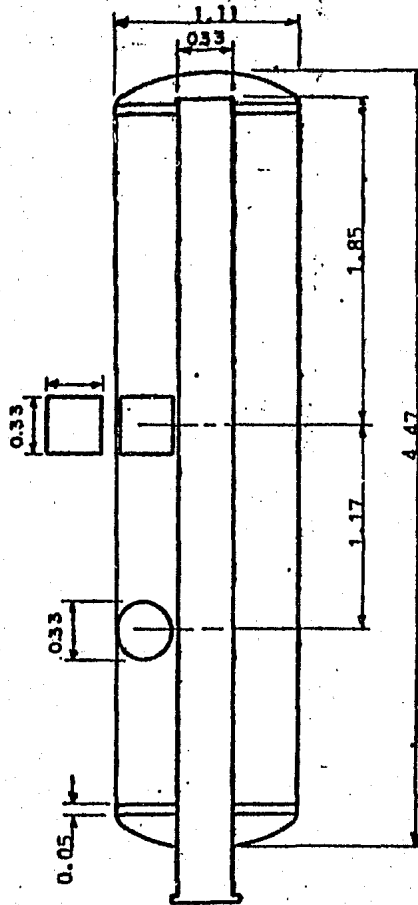
Debido a la dificultad de garantizar exactamente la diferencial de presión, se dejó un margen de 0.35 bar abs. abajo de la presión del separador de alta presión, para garantizar la correcta operación del sistema.

Al igual que en la Alternativa " A ", después de encontrar los diámetros requeridos para las condiciones de flujo. Se procedió a dar a la tubería la flexibilidad y el aislamiento requeridos en función de la expansión térmica y la temperatura respectivamente.

#### Equipo de Separación.

Cada pozo geotérmico cuenta con un equipo de separación de alta presión ( incluyendo los pozos de respaldo ); por lo tanto, se requerirán 25 separadores de alta presión. Para el dimensionamiento del equipo de separación de alta presión se siguió el mismo criterio que en la Alternativa " A ".

En la figura 5.11 se muestra el diagrama del separador de alta presión junto con sus características de diseño.



**CARACTERISTICAS.**

$W = 250\ 000\ \text{kg/h}$

$P = 13.29\ \text{bar abs.}$

$x = 99.9938\%$

Esc. 1:30

Acot. m

Fig. 5.11 Separador de alta presión.

Debido a que el segundo paso de evaporación-separación de todos los pozos se llevará a cabo en un sólo lugar ( en la planta de evaporación ), la cantidad y capacidad del equipo de separación de baja presión se determinó en base a tener el suficiente respaldo durante el mantenimiento de cada uno de los equipos dentro de la planta. Se consideró que con cinco equipos, cada uno del 50% de capacidad para las dos unidades, serían suficientes; interconectados de la manera mostrada en la figura 5.12.

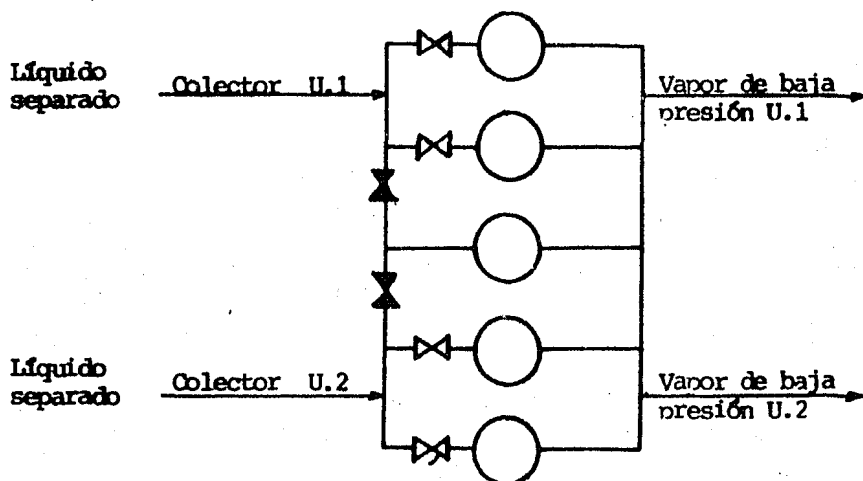


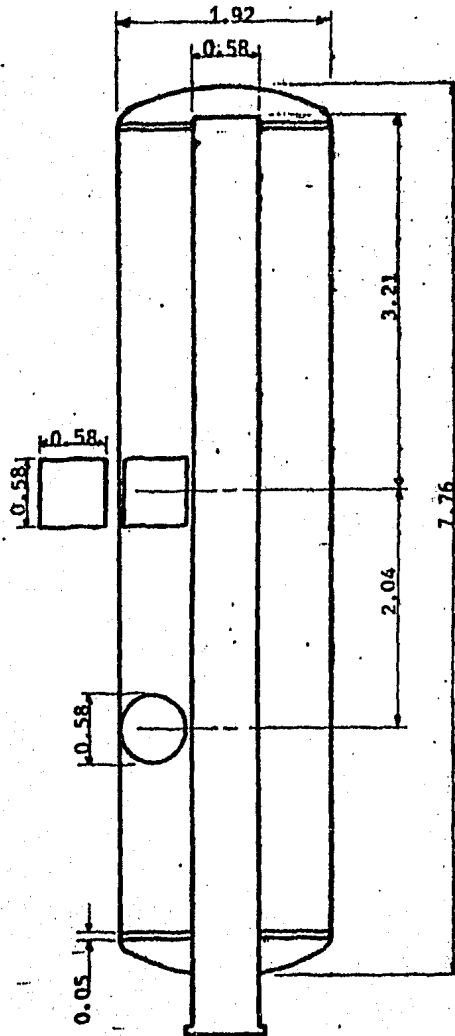
Fig. 5.12 Esquema del arreglo de separadores de baja presión en la Planta de Evaporación.

En la figura 5.13 se muestra el equipo de separación de baja presión junto con sus características de operación.

En el Plano No. 2 aparece el arreglo geométrico del colector de vapor de alta presión, a continuación se muestra la lista de líneas con las características de la tubería y del aislamiento.

En el Plano No. 3 aparece el arreglo geométrico del colector de líquido separado, con su respectiva lista de líneas de tubería.





**CARACTERISTICAS.**

**W = 712 011.5 kg/h**

**P = 5.38 bar abs.**

**x = 99.9321%**

**Esc. 1:20**

**Acot. m**

**Fig. 5.13 Separador de baja presión.**

Costo del Equipo de Separación.

En función de la cantidad y peso del equipo de separación, el costo total de dichos equipos será:

- 25 equipos de separación de alta presión = \$ 63'659,940.00
- 5 equipos de separación de baja presión = \$ 23'574,520.00

En función del área a limpiar se estimó el costo anual de mantenimiento del equipo de separación.

- Costo anual de mantenimiento = \$ 1'640,300.00

Costo de la Tubería.

Evaluando el costo de la tubería en función de su peso, tenemos:

- Costo de tubería de alta presión = \$ 412'537,070.00
- Costo de tubería de líquido separado = \$ 183'409,870.00

El costo total del aislamiento en función del área a cubrir será:

- Costo total del aislamiento = \$ 29'291,650.00

Flujo de Efectivo.

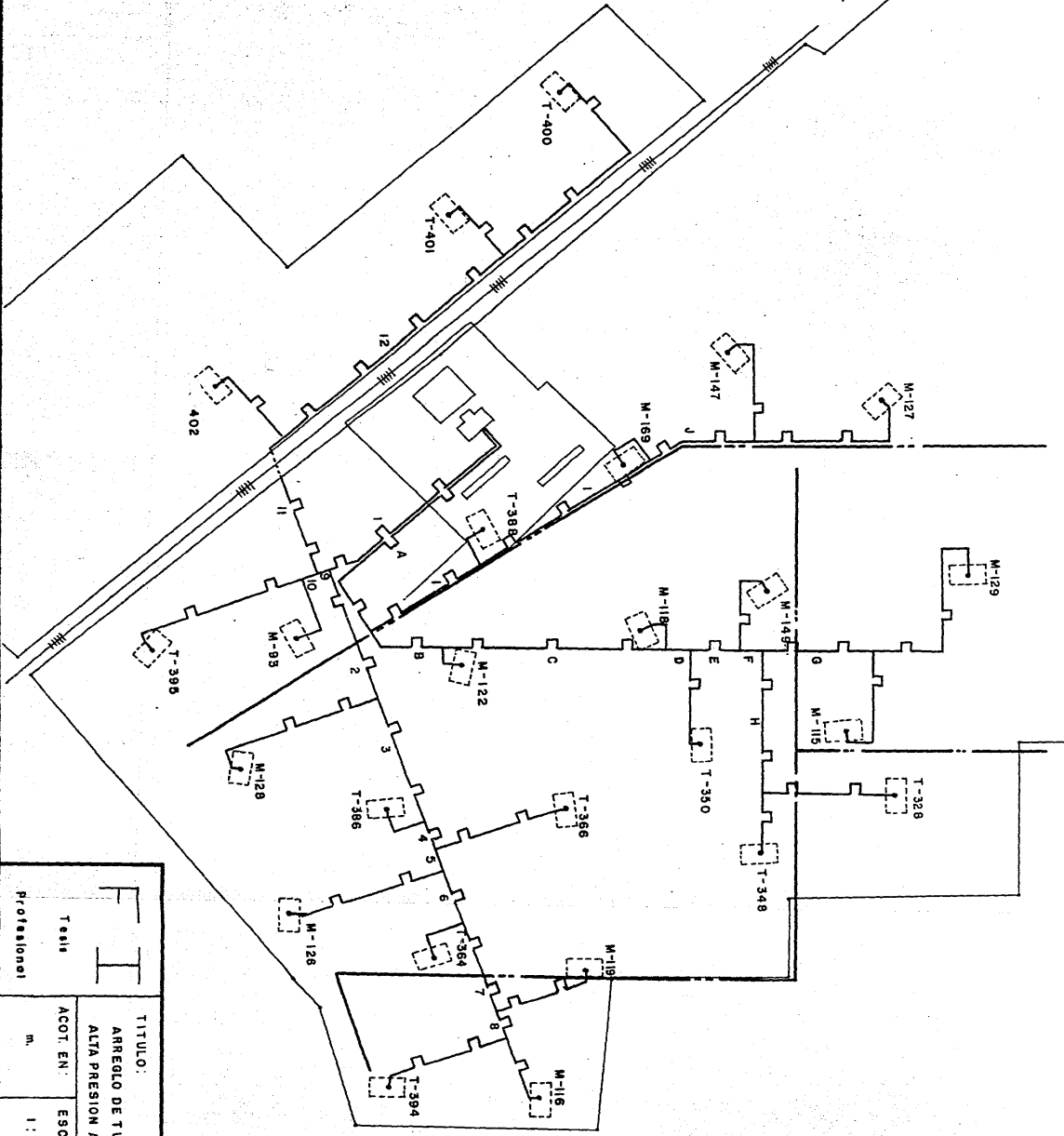
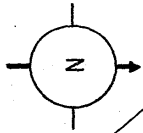
El costo inicial de esta alternativa será:

Costo de tubería	\$ 595'946,940.00
Costo de aislamiento	29'291,650.00
Costo de equipo de separación	<u>87'234,460.00</u>
	\$ 712'473,050.00


El valor presente de esta alternativa, considerando los parámetros económi-

cos mencionados al principio de éste Capítulo es:

V.P. = \$ 771'842,880.00



	TITULO:	FECHA:
	ARREGLO DE TUBERIA. VAPOR DE ALTA PRESION ALTERNATIVA B	JUNIO-84
Tesis Profesional	ACOT. EN: m.	ELABORADO: GAS L.A.T.R.
	ESCALA: 1:10 000	PLANO NO: 2

Numero de Lineo	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
1	40	0.750	—	12.28	189.03	637,134.0	IM-C592	1	698	
2	36	0.750	40	12.58	190.13	509,707.2	IM-C592	1	434	
3	34	0.625	30	12.84	191.07	445,993.8	IM-C592	1	420	
4	30	0.625	30	12.95	191.64	382,280.4	IM-C592	1	104	
5	28	0.625	30	13.05	191.64	318,567.0	IM-C592	1	82	
6	24	0.500	XS	13.26	192.56	254,853.6	IM-C592	1	192	
7	22	0.500	30 (XS)	13.57	193.60	191,140.2	IM-C592	1	310	
8	18	0.438	30	13.69	193.60	127,426.8	IM-C592	1	96	
9	28	0.625	30	12.33	189.03	318,567.0	IM-C592	1	46	
10	18	0.438	30	12.41	189.21	127,426.8	IM-C592	1	58	
11	22	0.500	30 (XS)	12.84	189.21	191,140.2	IM-C592	1	460	
12	18	0.438	30	13.87	191.07	127,426.8	IM-C592	1	858	
 <b>Tests Profesional</b>			<b>Descripcion:</b> Tuberías de vapor de alta presión. Unidad 1. Alternativa " B ".						Hoja No. 1 de. 3	


Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
M-116	12	0.375	STD	14.06	194.04	63,713.4	IM-C592	1	199	
T-394	12	0.375	STD	14.35	194.04	63,713.4	IM-C592	1	354	
M-119	12	0.375	STD	14.12	193.60	63,713.4	IM-C592	1	288	
T-364	12	0.375	STD	13.55	192.56	63,713.4	IM-C592	1	130	
M-126	12	0.375	STD	13.87	191.64	63,713.4	IM-C592	1	28	
T-366	12	0.375	STD	13.66	191.64	63,713.4	IM-C592	1	364	
T-386	12	0.375	STD	13.12	191.07	63,713.4	IM-C592	1	120	
M-128	12	0.375	STD	13.58	190.13	63,713.4	IM-C592	1	494	
M-93	12	0.375	STD	12.85	189.48	63,713.4	IM-C592	1	180	
T-395	12	0.375	STD	13.42	189.48	63,713.4	IM-C592	1	504	
T-402	12	0.375	STD	13.32	191.07	63,713.4	IM-C592	1	239	
T-401	12	0.375	STD	14.25	194.63	63,713.4	IM-C592	1	198	
<b>FI</b> Testa Profesional			Descripción: Tuberías de vapor de alta presión. Unidad 1. Alternativa " B ".						Hoja No. 2 de 3	

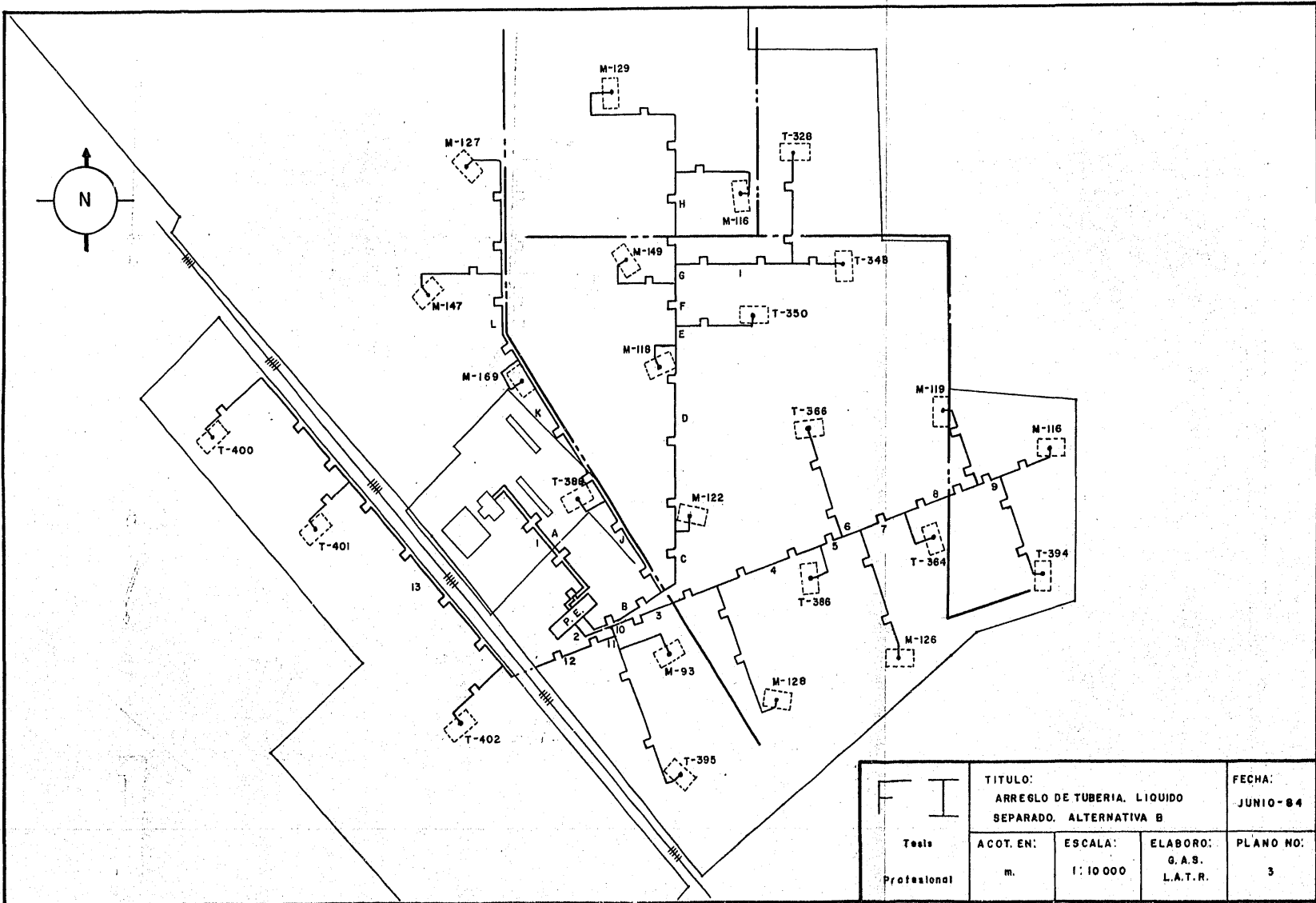
Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
T-400	12	0.375	STD	15.15	194.63	63,713.4	IM-C592	1	721	
<b>FI</b> Tesis Profesional			Descripcion: Tuberías de vapor de alta presión. Unidad 1. Alternativa " B ".						Hoja No. 3 de. 3	

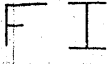
Numero de Línea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
A	40	0.750	—	12.40	189.48	637,134.0	IM-C592	1	867	
B	36	0.750	40	12.56	190.05	509,707.2	IM-C592	1	237	
C	34	0.625	30	12.96	191.47	445,993.8	IM-C592	1	663	
D	30	0.625	30	13.02	191.64	382,280.4	IM-C592	1	83	
E	28	0.625	30	13.15	192.17	318,567.0	IM-C592	1	151	
F	24	0.500	XS	13.23	192.45	254,853.6	IM-C592	1	87	
G	18	0.438	30	13.64	192.45	127,426.8	IM-C592	1	334	
H	18	0.438	30	13.77	192.45	127,426.8	IM-C592	1	434	
I	26	0.500	20 (XS)	13.18	189.48	254,853.6	IM-C592	1	980	
J	18	0.438	30	13.57	192.27	127,426.8	IM-C592	1	333	
M-129	12	0.375	STD	14.74	193.86	63,713.4	IM-C592	1	598	
M-115	12	0.375	STD	14.28	193.86	63,713.4	IM-C592	1	327	
			<b>Tesis</b> <b>Profesional</b> <b>Descripción:</b> Tuberías de vapor de alta presión. Unidad 2. Alternativa " B ".						<b>Hoja No. 1</b> de 2	



Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)
							Tipo	Espesor (pulgadas)	
T-328	12	0.375	STD	14.42	194.30	63,713.4	IM-C592	1	354
T-348	12	0.375	STD	14.05	194.30	63,713.4	IM-C592	1	154
M-149	12	0.375	STD	13.68	192.17	63,713.4	IM-C592	1	257
T-350	12	0.375	STD	13.56	191.64	63,713.4	IM-C592	1	269
M-118	12	0.375	STD	13.20	191.47	63,713.4	IM-C592	1	100
M-122	12	0.375	STD	12.74	190.05	63,713.4	IM-C592	1	70
T-388	12	0.375	STD	12.97	190.66	63,713.4	IM-C592	1	100
M-169	12	0.375	STD	13.50	192.27	63,713.4	IM-C592	1	140
M-147	12	0.375	STD	14.19	193.62	63,713.4	IM-C592	1	317
M-127	12	0.375	STD	14.45	193.62	63,713.4	IM-C592	1	474
		Tesis Profesional	Descripción: Tuberías de vapor de alta presión. Unidad 2. Alternativa " B ".						Hoja No. 2 de. 2


Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
1	28	0.375	STD	4.00	143.63	108,950.0	IM-C592	1	638	
2	26	0.625	—	6.67	162.61	1'424,023.0	IM-C592	1	130	
3	24	0.500	XS	8.22	171.46	1'139,218.4	IM-C592	1	434	
4	20	0.500	30 (XS)	10.29	181.62	996,816.1	IM-C592	1	410	
5	20	0.500	30 (XS)	10.56	182.46	854,413.8	IM-C592	1	104	
6	18	0.438	30	10.80	183.28	712,011.5	IM-C592	1	82	
7	14	0.375	30 (STD)	11.73	186.46	569,609.2	IM-C592	1	182	
8	12	0.375	STD	12.76	190.23	427,206.9	IM-C592	1	310	
9	10	0.365	40 (STD)	12.94	191.64	284,804.6	IM-C592	1	96	
M-116	6	0.280	40 (STD)	13.89	194.40	142,402.3	IM-C592	1	209	
T-394	6	0.280	40 (STD)	14.14	195.07	142,402.3	IM-C592	1	354	
M-119	6	0.280	40 (STD)	13.63	193.72	142,402.3	IM-C592	1	288	
			<b>Descripción:</b> Tuberías de mezcla. Unidad 1. Alternativa " B ".						Hoja No. 1 de 3	




 Tests Profesional	<b>TITULO:</b> ARREGLO DE TUBERIA, LIQUIDO SEPARADO, ALTERNATIVA B		<b>FECHA:</b> JUNIO-84
	<b>ACOT. EN:</b> m.	<b>ESCALA:</b> 1: 10 000	<b>ELABORO:</b> G. A. S. L. A. T. R.

Numero de Línea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
T-364	6	0.280	40 (STD)	13.18	192.34	142,402.3	IM-C592	1	140	
M-126-1	8	0.322	40 (STD)	11.57	186.46	142,402.3	IM-C592	1	209	
M-126-2	6	0.280	40 (STD)	13.55	193.72	142,402.3	IM-C592	1	209	
T-366-1	8	0.322	40 (STD)	11.29	184.89	142,402.3	IM-C592	1	182	
T-366-2	6	0.280	40 (STD)	13.44	193.04	142,402.3	IM-C592	1	182	
T-386	6	0.280	40 (STD)	12.77	190.93	142,402.3	IM-C592	1	120	
M-128-1	8	0.322	40 (STD)	10.11	179.91	142,402.3	IM-C592	1	252	
M-128-2	6	0.280	40 (STD)	13.52	193.72	142,402.3	IM-C592	1	252	
10	22	0.500	30 (XS)	6.82	163.81	712,011.5	IM-C592	1	46	
12	16	0.375	30 (STD)	8.70	173.94	427,206.9	IM-C592	1	450	
13	12	0.375	STD	11.99	187.99	284,804.6	IM-C592	1	868	
T-400-1	8	0.322	40 (STD)	12.52	189.48	142,402.3	IM-C592	1	227	
			<b>Descripción:</b> Tuberías de mezcla. Unidad 1. Alternativa " B ".						Hoja No. 2 de. 3	

Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
T-400-2	6	0.280	40 (STD)	15.12	198.32	142,402.3	IM-C592	1	494	
T-401	6	0.280	40 (STD)	14.10	195.07	142,402.3	IM-C592	1	198	
T-402	6	0.280	40 (STD)	13.26	192.34	142,402.3	IM-C592	1	339	
11	12	0.375	STD	7.17	165.55	284,804.6	IM-C592	0.5	58	
M-93	6	0.280	40 (STD)	12.53	189.48	142,402.3	IM-C592	1	170	
T-395-1	8	0.322	40 (STD)	9.21	176.31	142,402.3	IM-C592	0.5	227	
T-395-2	6	0.280	40 (STD)	13.11	192.34	142,402.3	IM-C592	1	277	
<b>FI</b> <b>Tesis Profesional</b>		<b>Descripción:</b> Tuberías de mezcla. Unidad 1. Alternativa " B ".							<b>Hoja No. 3</b> <b>de 3</b>	

Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
A	28	0.375	STD	4.00	143.63	108,950.0	IM-C592	0.5	647	
B	28	0.375	STD	7.17	165.55	1'424,023.0	IM-C592	1	354	
C	24	0.500	XS	8.02	170.43	1'139,218.4	IM-C592	1	237	
D	22	0.500	30 (XS)	10.17	180.77	996,816.1	IM-C592	1	663	
E	18	0.438	30	10.46	181.62	854,413.8	IM-C592	1	83	
F	16	0.375	30 (STD)	11.22	184.89	712,011.5	IM-C592	1	151	
G	16	0.375	30 (STD)	11.38	185.68	569,609.2	IM-C592	1	87	
H	10	0.365	40 (STD)	12.91	191.64	284,804.5	IM-C592	1	334	
M-129-1	8	0.322	40 (STD)	13.61	193.72	142,402.3	IM-C592	1	439	
M-129-2	6	0.280	40 (STD)	14.59	197.04	142,402.3	IM-C592	1	159	
M-115	6	0.280	40 (STD)	14.08	195.07	142,402.3	IM-C592	1	317	
I	10	0.365	40 (STD)	13.40	193.04	284,804.5	IM-C592	1	434	
 <b>Tesis</b> <b>Profesional</b>			<b>Descripcion:</b> Tuberías de mezcla. Unidad 2. Alternativa " B ".						Hoja No. 1 de. 3	

Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
T-328	6	0.280	40 (STD)	14.36	196.39	142,402.3	IM-C592	1	354	
T-348	6	0.280	40 (STD)	13.94	195.07	142,402.3	IM-C592	1	154	
M-149	6	0.280	40 (STD)	13.32	192.34	142,402.3	IM-C592	1	267	
T-350	6	0.280	40 (STD)	13.45	193.04	142,402.3	IM-C592	1	279	
M-118	6	0.280	40 (STD)	12.85	190.93	142,402.3	IM-C592	1	90	
M-122	6	0.280	40 (STD)	12.43	189.48	142,402.3	IM-C592	1	70	
J	16	0.375	30 (STD)	9.84	179.03	569,609.2	IM-C592	1	388	
K	16	0.375	30 (STD)	11.89	187.23	569,609.2	IM-C592	1	592	
L	10	0.365	40 (STD)	13.14	191.64	284,804.6	IM-C592	1	343	
M-127-1	8	0.322	40 (STD)	13.36	193.04	142,402.3	IM-C592	1	177	
M-127-2	6	0.280	40 (STD)	14.16	195.74	142,402.3	IM-C592	1	297	
M-147	6	0.280	40 (STD)	14.18	195.74	142,402.3	IM-C592	1	317	
			Tesis Descripción: Tuberías de mezcla. Unidad 2. Alternativa " B ".						Hoja No. 2 de. 3	

Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
M-169	6	0.280	40 (STD)	13.27	192.34	142,402.3	IM-C592	1	150	
T-388	6	0.280	40 (STD)	12.47	189.48	142,402.3	IM-C592	1	100	
<b>F I</b> Tesis Profesional			Descripción: Tuberías de mezcla. Unidad 2. Alternativa " B ".						Hoja No. 3 de. 3	



## 5.4 ALTERNATIVA " C ".

Esta alternativa consta de cuatro plantas de evaporación, distribuidas en el campo geotérmico. A estas plantas se envía la producción de los pozos próximos a ellas, para que ahí se realicen los dos pasos de evaporación-separación; enviando de ahí hacia la casa de máquinas líneas de vapor de alta y baja presión. En la figura 5.14 se puede observar en forma simplificada este método de conducción.

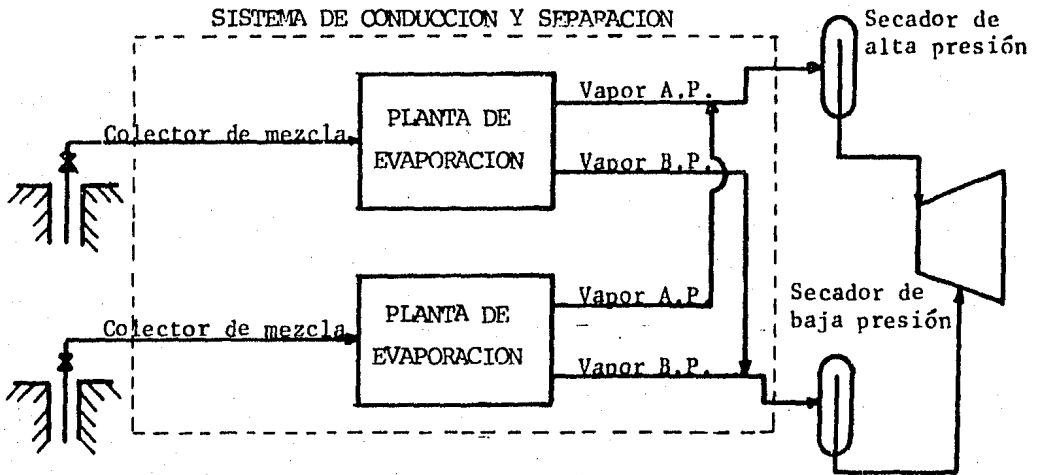


Fig. 5.14 Diagrama básico Alternativa " C ".

La ubicación de las plantas de evaporación se determinó de forma tal que los desarrollos de tubería sean mínimos y hacer el arreglo más sencillo.

Debido a esto las plantas de evaporación quedaron con el siguiente número de pozos cada una:

Planta de Evaporación No. 1	5 pozos
Planta de Evaporación No. 2	6 "
Planta de Evaporación No. 3	7 "
Planta de Evaporación No. 4	7 "

Las plantas No. 1 y No. 2 alimentarán a una unidad y las plantas No. 3 y No. 4 a la otra.

Procedimiento de Dimensionamiento.

A partir de las condiciones en los secadores de alta presión se dimensionaron las líneas de vapor de alta presión que conectan a cada planta de evaporación con la casa de máquinas, obteniendo las presiones de operación de los separadores de alta presión. La presión de operación de los separadores de baja presión se obtuvo en base al balance mostrado en la figura 5.15, para garantizar el flujo preciso de vapor de baja presión.

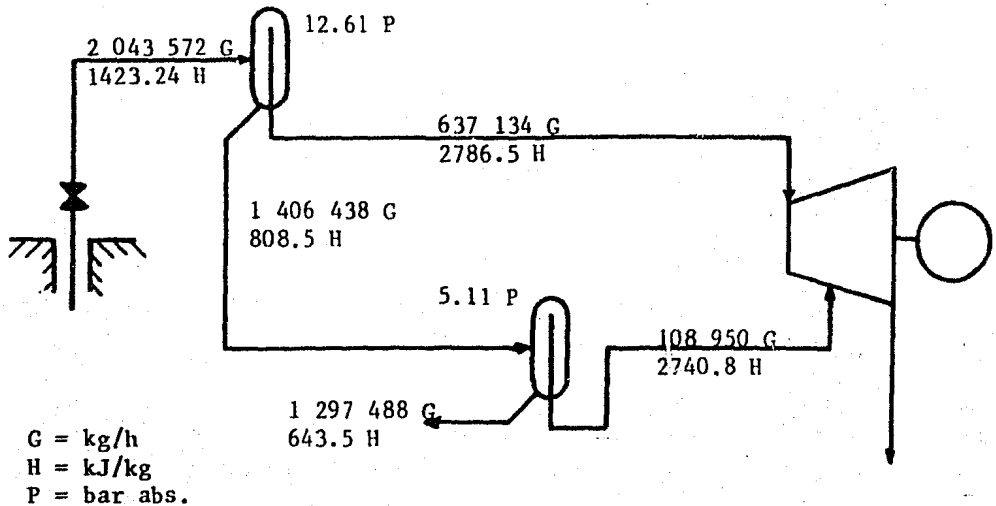


Fig. 5.15

Las líneas de vapor de baja presión se dimensionaron en base a la diferencial de presión existente entre los separadores de baja presión de cada una de las plantas de evaporación y los secadores de baja presión, tratando de conservar las velocidades recomendadas para la conducción de vapor.

Partiendo de la presión de operación del equipo de separación de alta presión, se dejó un margen de 1 bar para distribuir el flujo dentro de la planta de evaporación, dimensionando los colectores de mezcla a partir de

dicho margen. Para el dimensionamiento del colector de mezcla se consideró flujo isentálpico, tomando como entalpía total la existente en el cabezal del pozo.

Para cada planta de evaporación sus dos respectivos colectores de mezcla se diseñaron en base a una diferencial de presión disponible entre la entrada a la planta de evaporación y la de la salida del pozo, tratando de garantizar las velocidades recomendadas de conducción de mezcla bifásica presentadas en el Capítulo 4.

Después de encontrar los diámetros requeridos para las condiciones de flujo se procedió a estimar la flexibilidad y el aislamiento térmico requerido.

#### Equipo de Separación.

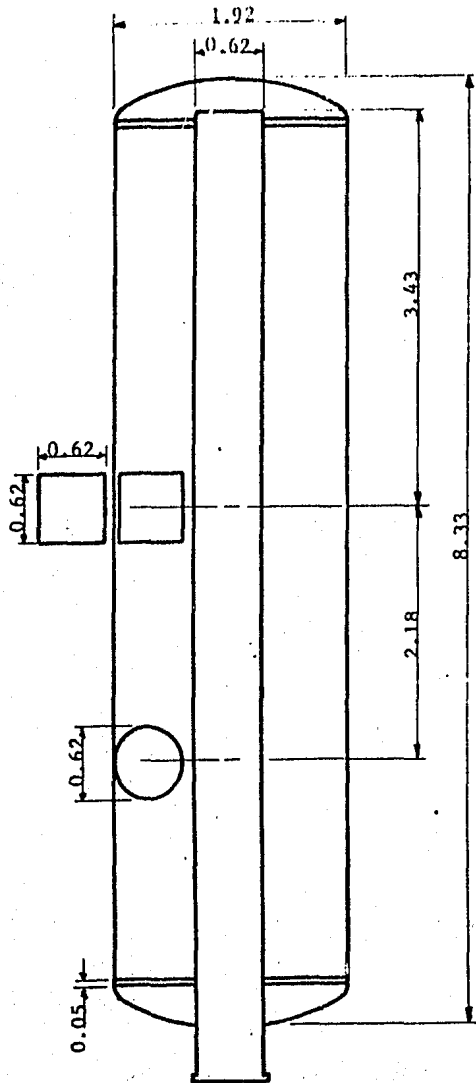
Debido a que cada pozo geotérmico enviará su producción total a la planta de evaporación más próxima y cada planta maneja diferente número de pozos, se diseñaron las cuatro plantas de evaporación iguales, garantizando que la calidad del vapor separado ( en alta y baja presión ) permaneciera arriba del 99.9% a diferentes condiciones de flujo.

Se consideró que dos separadores de alta presión y dos de baja presión diseñados en base al flujo de tres pozos y verificando que cumplieran con la calidad requerida para un flujo de dos pozos y para un flujo de cuatro pozos, darán el respaldo suficiente en caso de mantenimiento o avería de alguno de los equipos.

Se tomó como base de diseño a los separadores que operan a la menor presión.

En las figuras 5.16 y 5.17 se muestran los equipos de separación de alta y baja presión respectivamente, junto con sus características de operación.

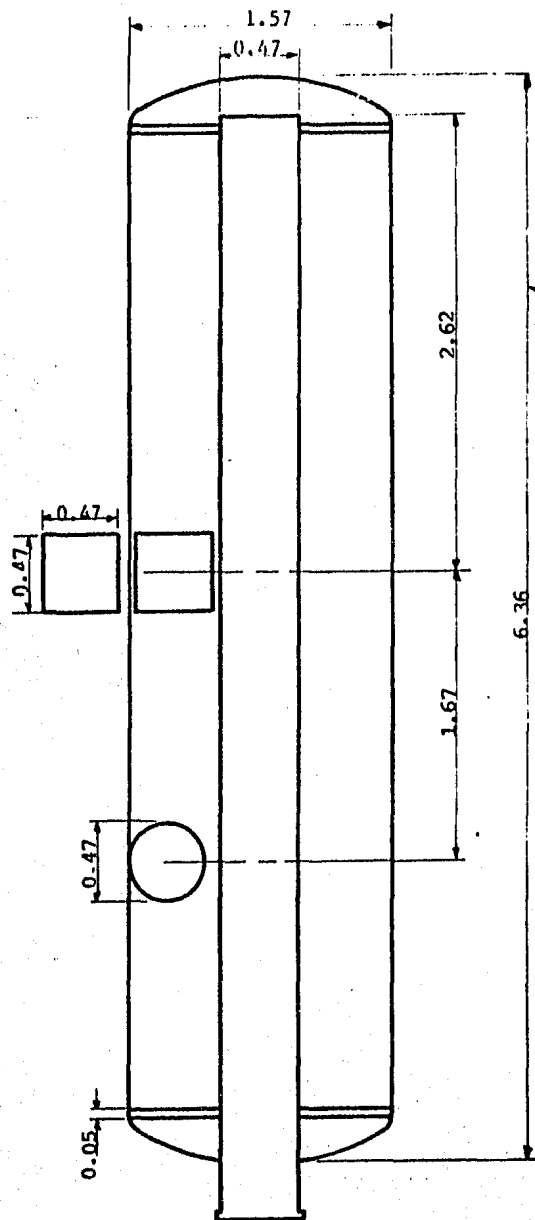
En el Plano No. 4 aparece la localización de las plantas de evaporación, el arreglo geométrico de los colectores de mezcla y a continuación se muestra la lista de líneas con las características de la tubería y del aislamiento.



CARACTERISTICAS.  
 W = 750 000 kg/h  
 P = 12.7 bar abs.  
 x = 99.9440%

Esc. 1:20  
 Acot. m

Fig. 5.16 Separador de alta presión.

**CARACTERISTICAS.**

W = 517 371.55 kg/h

P = 4.8 bar abs.

x = 99.9734%

Esc. 1:30

Acot. m

Fig. 5.17 Separador de baja presión.

Costo del Equipo de Separación.

En función de la cantidad y peso del equipo de separación, el costo total de dichos equipos será:

- 8 equipos de separación de alta presión = \$ 98'337,010.00
- 8 equipos de separación de baja presión = \$ 22'179,560.00

En función del área a limpiar se estimó el costo anual de mantenimiento del equipo de separación.

- Costo anual de mantenimiento = \$ 1'786,060.00

Costo de la Tubería.

Evaluando el costo de la tubería en función de su peso, tenemos:

- Costo de tubería de alta presión = \$ 262'567,930.00
- Costo de tubería de baja presión = \$ 103'619,640.00
- Costo de tubería de mezcla = \$ 350'459,900.00

El costo total del aislamiento en función del área a cubrir será:

- Costo total del aislamiento = \$ 25'865,950.00

Flujo de Efectivo.

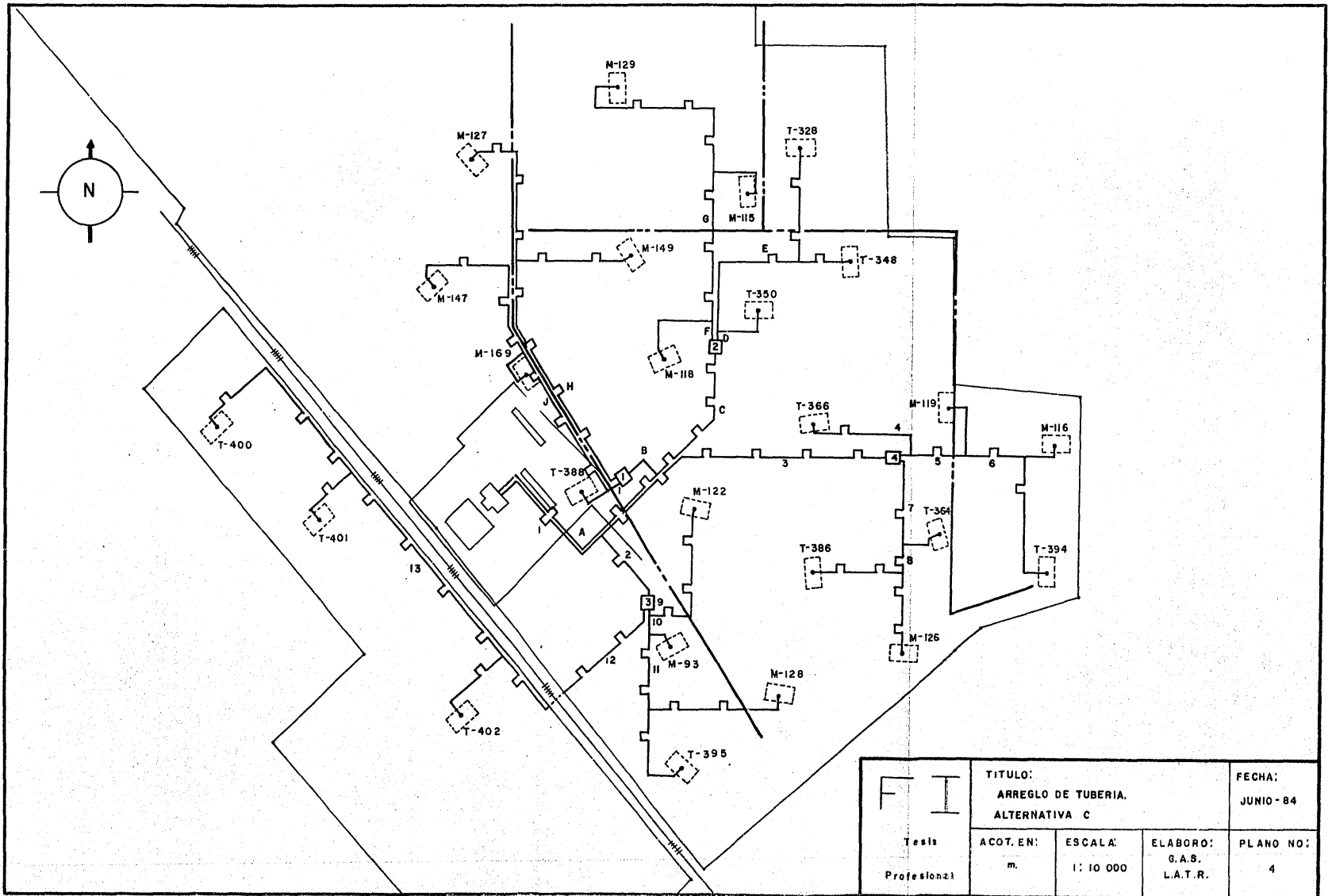
El costo inicial de esta alternativa será:

Costo de tubería	\$ 716'647,470.00
Costo de aislamiento	25'865,950.00
Costo de equipo de separación	<u>120'516,570.00</u>
	\$ 863'029,990.00

El valor presente de esta alternativa, considerando los parámetros económi-

cos mencionados al principio de este Capítulo es:

V.P. = \$ 963'764,340.00





<b>F I</b> <small>Tesis Profesional</small>	<b>TITULO:</b> ARREGLO DE TUBERIA. ALTERNATIVA C		<b>FECHA:</b> JUNIO-84
	<b>ACOT. EN:</b> m.	<b>ESCALA:</b> 1: 10 000	<b>ELABORO:</b> G.A.S. L.A.T.R.



Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
1	42	1	--	12.14	188.52	700,847.4	IM-C592	1	492	
2	34	0.875	--	12.35	189.32	445,993.8	IM-C592	1	271	
3	34	0.875	--	12.94	191.44	445,993.8	IM-C592	1	1192	
<b>F I</b> <b>Tests</b> <b>Profesional</b>			<b>Descripcion:</b> <b>Tuberías de vapor de alta presión. Unidad 1. Alternativa " C ".</b>						<b>Hoja No. 1</b> <b>de. 1</b>	


Numero de Lineo	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
1	26	0.6875	--	4.80	150.32	119,845.0	IM-C592	0.5	492	
2	20	0.594	40	5.10	152.60	76,265.0	IM-C592	0.5	271	
3	20	0.594	40	5.10	152.60	76,265.0	IM-C592	0.5	1192	
<b>F I</b> Tesis Profesional			Descripcion: Tuberías de vapor de baja presión. Unidad 1. Alternativa " C ".						Hoja No. 1 de. 1	

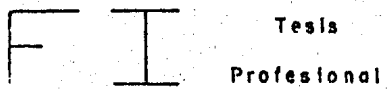
Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Alambramiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
9	28	0.6875	--	13.46	193.04	1'000,000.0	LM-C592	1	20	
10	28	0.6875	--	13.66	193.72	750,000.0	LM-C592	1	72	
11	20	0.594	40	15.06	198.32	500,000.0	LM-C592	1	286	
12	28	0.6875	--	14.89	197.69	750,000.0	LM-C592	1	748	
13	22	0.875	60	17.49	205.76	500,000.0	LM-C592	1	880	
M-122	14	0.375	30 (STD)	17.31	211.14	250,000.0	LM-C592	1	505	
M-93	14	0.375	30 (STD)	14.36	197.69	250,000.0	LM-C592	1	70	
M-128	12	0.375	STD	19.99	212.42	250,000.0	LM-C592	1	464	
T-395	12	0.375	STD	18.44	208.51	250,000.0	LM-C592	1	297	
T-402	12	0.375	STD	17.82	207.15	250,000.0	LM-C592	1	247	
T-401	12	0.375	STD	19.70	211.14	250,000.0	LM-C592	1	209	
T-400	16	0.500	40 (STD)	19.82	212.42	250,000.0	LM-C592	1	720	
 Tesis Profesional			Descripción: Planta de Evaporación 3. Unidad 1. Alternativa " C " .						Hoja No. 1 de 1	

Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
4	30	0.6875	--	14.06	195.07	1'000,000.0	IM-C592	1	30	
5	26	0.6875	--	14.65	197.04	750,000.0	IM-C592	1	205	
6	22	0.875	60	15.35	199.88	500,000.0	IM-C592	1	224	
7	26	0.6875	--	14.81	197.69	750,000.0	IM-C592	1	286	
8	22	0.875	60	15.20	198.32	500,000.0	IM-C592	1	109	
T-366	14	0.375	30 (STD)	17.10	209.84	250,000.0	IM-C592	1	392	
M-119	12	0.375	STD	16.94	204.34	250,000.0	IM-C592	1	180	
M-116	12	0.375	STD	16.72	202.89	250,000.0	IM-C592	1	110	
T-394	12	0.375	STD	19.99	212.42	250,000.0	IM-C592	1	409	
T-364	12	0.375	STD	17.37	205.76	250,000.0	IM-C592	1	200	
M-126	12	0.375	STD	18.04	207.15	250,000.0	IM-C592	1	256	
T-386	12	0.375	STD	18.57	208.51	250,000.0	IM-C592	1	300	
 <b>Tesis Profesional</b>			<b>Descripcion:</b> Planta de Evaporación 4. Unidad 1. Alternativa " C ".						<b>Hoja No. 1</b> de. 1	

Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
A	40	0.875	--	12.35	189.32	637,134.0	IM-C592	1	794	
B	28	0.6875	--	12.49	189.48	318,567.0	IM-C592	1	120	
C	32	0.750	--	12.68	190.20	382,280.4	IM-C592	1	556	
<b>FI</b> Tecnico Profesional			Descripción: Tuberías de vapor de alta presión. Unidad 2. Alternativa " C ".						Hoja No. 1 de. 1	

Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
A	24	0.688	40	4.80	150.32	108,950.0	IM-C592	0.5	794	
B	16	0.500	40	5.10	152.60	54,475.0	IM-C592	0.5	120	
C	18	0.500	XS	5.10	152.60	65,370.0	IM-C592	0.5	556	
<b>FI</b> Tesis Profesional			Descripcion: Tuberías de vapor de baja presión. Unidad 2. Alternativa " C ".						Hoja No. 1 de. 1	

Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
H	22	0.875	60	16.46	202.89	500,000.0	IM-C592	1	922	
I	26	0.6875	--	13.67	193.72	750,000.0	IM-C592	1	50	
J	22	0.875	60	15.66	198.32	500,000.0	IM-C592	1	609	
M-127	14	0.438	40	19.83	212.42	250,000.0	IM-C592	1	526	
M-149	14	0.438	40	19.04	209.84	250,000.0	IM-C592	1	390	
M-147	14	0.438	40	19.91	212.42	250,000.0	IM-C592	1	642	
M-169	12	0.375	STD	16.89	205.76	250,000.0	IM-C592	1	150	
T-388	12	0.375	STD	14.56	198.32	250,000.0	IM-C592	1	100	
 Tesis Profesional			Descripción: Planta de Evaporación 1. Unidad 2. Alternativa " C ".						Hoja No. 1 de 1	

Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
D	24	0.688	40	13.87	194.40	750,000.0	IM-C592	1	30	
E	22	0.875	60	15.58	199.88	500,000.0	IM-C592	1	530	
F	24	0.688	40	13.99	195.07	750,000.0	IM-C592	1	60	
G	22	0.875	60	15.70	199.88	500,000.0	IM-C592	1	560	
T-328	12	0.375	STD	19.55	211.14	250,000.0	IM-C592	1	364	
T-348	12	0.375	STD	17.30	205.76	250,000.0	IM-C592	1	156	
T-350	14	0.375	30 (STD)	15.32	201.41	250,000.0	IM-C592	1	170	
M-129	14	0.375	30 (STD)	19.86	212.42	250,000.0	IM-C592	1	740	
M-115	12	0.375	STD	18.05	207.15	250,000.0	IM-C592	1	190	
M-118	14	0.375	30 (STD)	16.03	204.34	250,000.0	IM-C592	1	250	
			Descripción: Planta de Evaporación 2. Unidad 2. Alternativa " C ".						Hoja No. 1 de. 1	



### 5.5 ALTERNATIVA " D " .

En esta alternativa, los dos pasos de evaporación-separación se realizarán en un sólo lugar, es decir, en una planta de evaporación localizada cerca de la casa de máquinas. Por lo tanto, el flujo de mezcla de cada pozo es conducido por medio de colectores de mezcla hacia la planta de evaporación. Debido a que dicho colector de mezcla manejará el flujo total del pozo, se utilizarán tres colectores por unidad para evitar el uso de diámetros excesivamente grandes.

En la figura 5.18 se muestra en una forma simplificada este método de conducción.

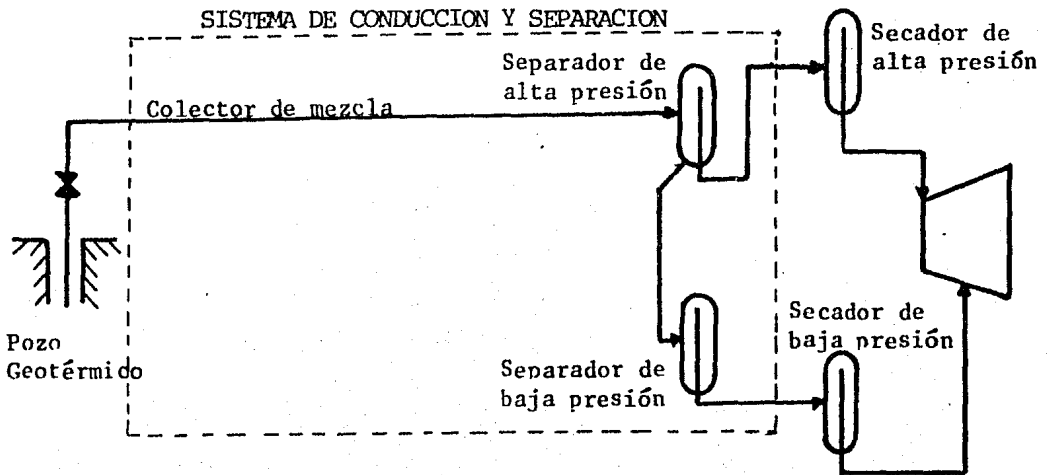


Fig. 5.18 Diagrama básico Alternativa " D " .

#### Procedimiento de Dimensionamiento.

A partir de las condiciones en los secadores de alta presión ( presión y flujo másico ) y en base a velocidades recomendadas, se dimensionaron las líneas de vapor de alta presión que conecta a la casa de máquinas con la planta de evaporación, obteniendo la presión de operación de los separadores de alta presión.

La presión de operación de los separadores de baja presión se obtuvo en base al balance mostrado en la figura 5.19.

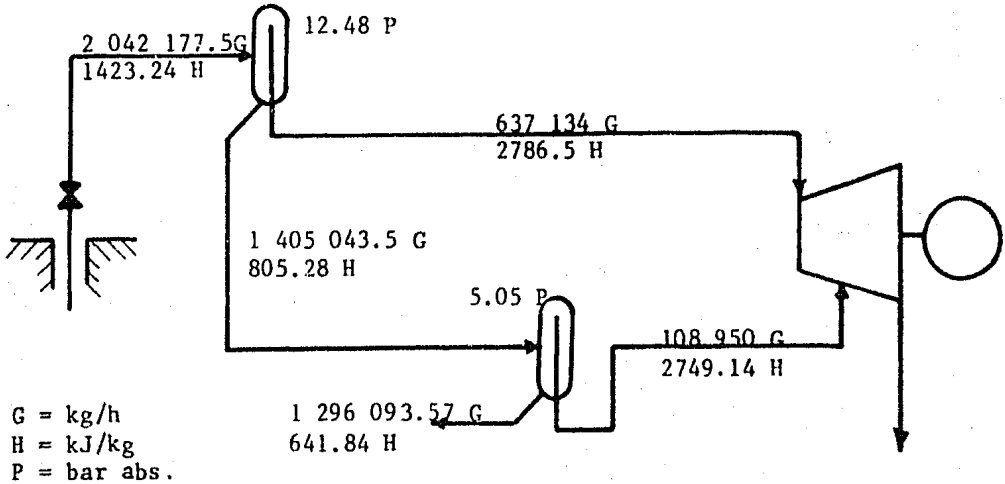


Fig. 5.19

Las líneas de vapor de baja presión se dimensionaron en base a la diferencia de presión entre los separadores de baja presión en la planta de evaporación y los secadores de baja presión en la casa de máquinas; tratando de conservar las velocidades recomendadas para la conducción de vapor.

La localización de la planta de evaporación se llevó a cabo con el procedimiento presentado en el Capítulo 4, para garantizar que el contenido de sólidos totales sea menor a 1 ppm.

Partiendo de la presión de operación del equipo de separación de alta presión, se dejó un margen de 2 bar abs. para distribuir el flujo dentro de la planta de evaporación, dimensionando los colectores de mezcla a partir de dicho margen.

Para el dimensionamiento del colector de mezcla se consideró flujo isoentálpico, tomando como entalpía total la existente en el cabezal del pozo y se limitó la presión en el mismo a 20 bar abs. debido al abatimiento esperado.

Cada colector de mezcla se diseñó en base a la diferencial de presión existente entre la entrada a la planta de evaporación y la de la salida de cada pozo, tratando de respetar las velocidades recomendadas de conducción de mezcla presentadas en el Capítulo 4.

Al igual que en todas las alternativas anteriores, después de encontrar los diámetros requeridos para las condiciones de flujo, se procedió a dar a la tubería la flexibilidad y el aislamiento térmico requerido.

#### Equipo de Separación.

Debido a que los dos pasos de evaporación-separación se realizarán en un sólo lugar ( planta de evaporación ) y de la misma manera que en los separadores de baja presión de la Alternativa " B ", se determinó la capacidad y la cantidad del equipo de separación; en base a tener el suficiente respaldo durante el mantenimiento o avería de cada uno de los equipos, determinándose colocar cinco equipos con una capacidad del 50% por unidad ( para alta y baja presión ). El arreglo de estos equipos es similar al presentado en la Alternativa " B " para los separadores de baja presión.

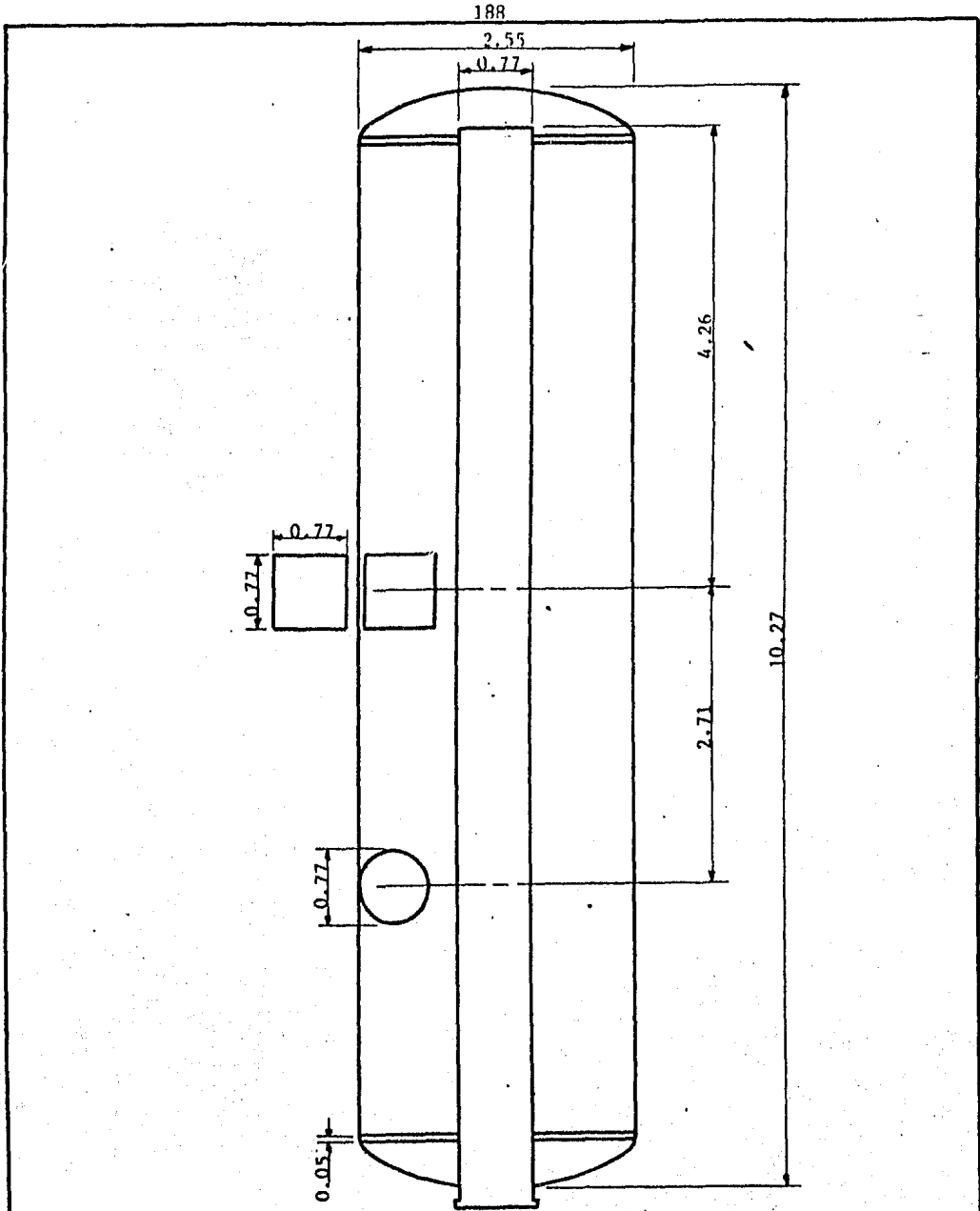
En las figuras 5.20 y 5.21 se puede observar el equipo de separación requerido junto con sus características de proceso.

En el Plano No. 5 aparece el arreglo geométrico de los colectores de vapor, y a continuación se muestra la lista de líneas con las características de la tubería y aislamiento.

#### Costo del Equipo de Separación.

En función de la cantidad y peso del equipo de separación, el costo total de dichos equipos será:

- 5 equipos de separación de alta presión = \$ 116'910,210.00
- 5 equipos de separación de baja presión = \$ 30'999,970.00



**CARACTERISTICAS.**

W = 1 250 000 kg/h

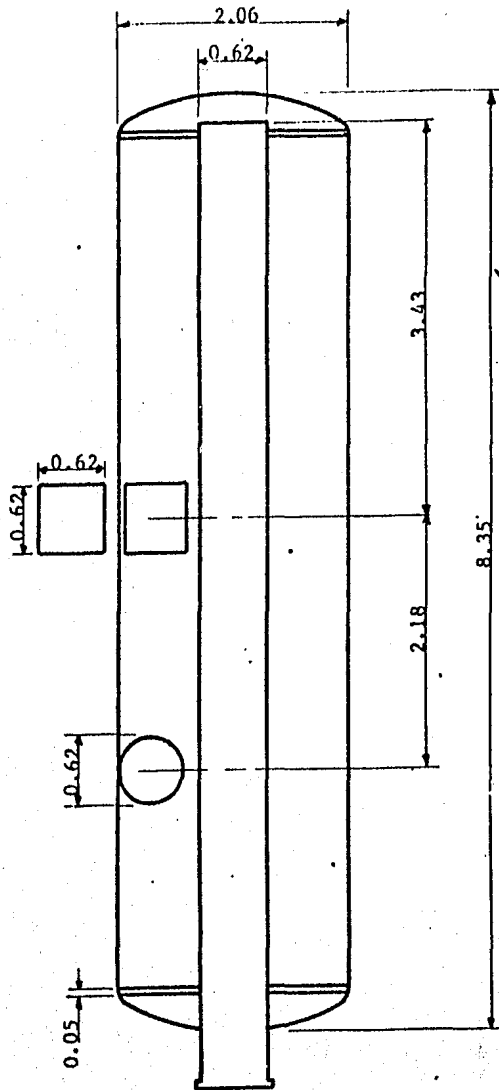
P = 12.48 bar abs.

x = 99.9005%

Esc. 1:20

Acot. m

Fig. 5.20 Separador de alta presión.



**CARACTERISTICAS.**

W = 860 619.71 kg/h

P = 5.05 bar. abs

x = 99.9053%

Esc. 1:20

Acot. m

Fig. 5.21 Separador de baja presión.

En función del área a limpiar se estimó el costo anual de mantenimiento del equipo de separación.

- Costo anual de mantenimiento = \$ 1'784,050.00

Costo de la Tubería.

Evaluando el costo de la tubería en función de su peso, tenemos:

- Costo de tubería de alta presión = \$ 91'211,940.00

- Costo de tubería de baja presión = \$ 47'244,980.00

- Costo de tubería de mezcla = \$ 507'290,760.00

El costo total del aislamiento en función del área a cubrir será:

- Costo total del aislamiento = \$ 24'294,570.00

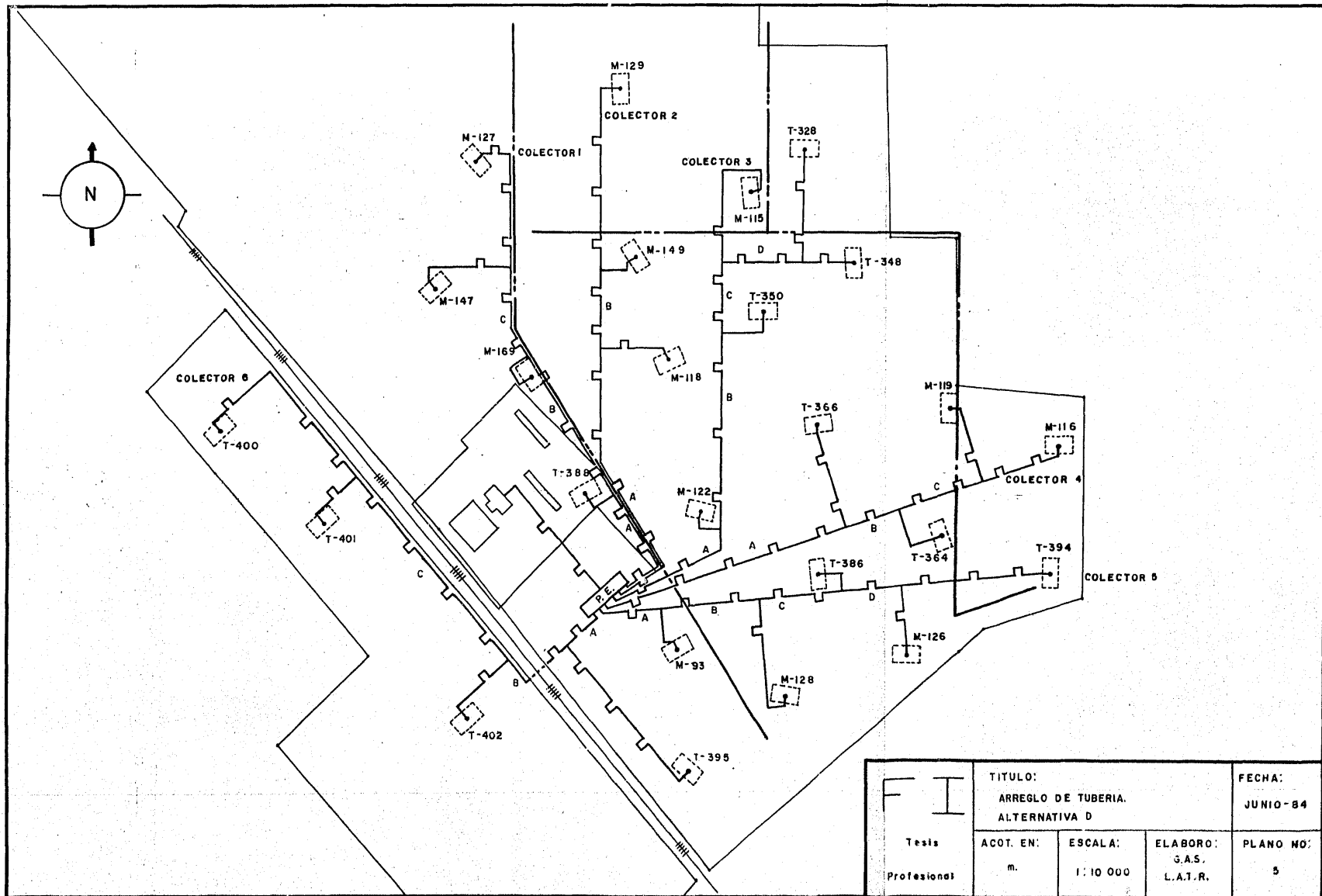
Flujo de Efectivo.

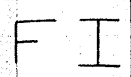
El costo inicial de esta alternativa será:

Costo de tubería	\$ 645'747,680.00
Costo de aislamiento	24'294,570.00
Costo de equipo de separación	<u>147'910,180.00</u>
	\$ 817'952,430.00

El valor presente de esta alternativa, considerando los parámetros económicos mencionados al principio de este Capítulo es:


V.P. = \$ 956'211,890.00




 Tesis Profesional	TITULO: ARREGLO DE TUBERIA. ALTERNATIVA D		FECHA: JUNIO-84
	ACOT. EN: m.	ESCALA: 1:10 000	ELABORO: G.A.S. L.A.T.R.


Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
1	40	0.875	—	12.17	188.74	637,134.0	IM-C592	1	534	
A	40	0.875	—	12.17	188.74	637,134.0	IM-C592	1	534	
<b>FI</b> Tesis Profesional			Descripción: Tuberías de vapor de alta presión. Unidad 1 y Unidad 2. Alternativa " D ".						Hoja No. 1 de 1	



Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
2	22	0.875	60	5.05	152.23	108,950.0	IM-C592	0.5	534	
B	22	0.875	60	5.05	152.23	108,950.0	IM-C592	0.5	534	
 <b>Tesis Profesional</b>			<b>Descripción:</b> Tuberías de vapor de baja presión. Unidad 1 y Unidad 2. Alternativa " D ".						<b>Hoja No. 1</b> de. 1	

Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
4-A	32	0.750	--	16.11	201.41	1'000,000.0	IM-C592	1	965	
4-B	26	0.6875	--	16.67	202.89	750,000.0	IM-C592	1	216	
4-C	20	0.594	40	18.05	207.15	500,000.0	IM-C592	1	326	
M-116	14	0.438	40	19.94	212.42	250,000.0	IM-C592	1	304	
M-119	14	0.438	40	19.64	211.14	250,000.0	IM-C592	1	240	
T-364	14	0.438	40	18.02	207.15	250,000.0	IM-C592	1	180	
T-366	14	0.438	40	18.40	208.51	250,000.0	IM-C592	1	336	
<b>FI</b> Tesis Profesional			Descripción: Colector de mezcla No. 4. Unidad 1. Alternativa " D ".						Hoja No. 1 de. 1	

Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
5-A	34	0.875	—	15.02	198.32	1'250,000.0	IM-C592	1	251	
5-B	30	0.6875	—	15.84	201.41	1'000,000.0	IM-C592	1	362	
5-C	26	0.6875	—	16.62	202.89	750,000.0	IM-C592	1	290	
5-D	20	0.594	40	17.63	205.76	500.000.0	IM-C592	1	239	
T-394	14	0.438	40	20.80	213.67	250,000.0	IM-C592	1	517	
M-126	14	0.438	40	18.95	209.84	250,000.0	IM-C592	1	201	
T-386	14	0.438	40	17.30	205.76	250,000.0	IM-C592	1	80	
M-128	14	0.438	40	18.71	208.51	250,000.0	IM-C592	1	401	
M-93	14	0.438	40	16.00	201.41	250,000.0	IM-C592	1	110	
		<b>Tests</b> <b>Profesional</b>		<b>Descripción:</b> Colector de mezcla No. 5. Unidad 1. Alternativa " D ".					<b>Hoja No. 1</b> <b>de. 1</b>	

Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
6-A	30	0.6875	--	14.95	198.32	1'000,000.0	IM-C592	1	172	
6-B	26	0.6875	--	15.73	199.88	750,000.0	IM-C592	1	274	
6-C	22	0.875	60	18.21	207.15	500,000.0	IM-C592	1	872	
T-400	16	0.500	40 (XS)	20.48	213.67	250,000.0	IM-C592	1	720	
T-401	14	0.438	40	19.47	211.14	250,000.0	IM-C592	1	190	
T-402	14	0.438	40	17.41	205.76	250,000.0	IM-C592	1	229	
T-395	16	0.500	40 (XS)	17.25	204.34	250,000.0	IM-C592	1	630	
			Descripción: Colector de mezcla No. 6. Unidad 1. Alternativa " D ".						Hoja No. 1 de. 1	

Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
1-A	30	0.6875	---	15.63	199.88	1'000,000.0	IM-C592	1	456	
1-B	26	0.6875	--	17.12	204.34	750,000.0	IM-C592	1	582	
1-C	20	0.594	40	18.54	208.51	500,000.0	IM-C592	1	336	
M-127-1	16	0.500	40 (XS)	19.10	209.84	250,000.0	IM-C592	1	180	
M-127-2	14	0.438	40	20.95	214.90	250,000.0	IM-C592	1	289	
M-147	14	0.438	40	19.98	212.42	250,000.0	IM-C592	1	310	
M-169	14	0.438	40	18.28	207.15	250,000.0	IM-C592	1	150	
T-388	14	0.438	40	16.48	202.89	250,000.0	IM-C592	1	100	
<b>F I</b> Tesis Profesional			Descripción: Colector de mezcla No. 1. Unidad 2. Alternativa " D ".						Hoja No. 1 de. 1	

Numero de Linea	Diametro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
2-A	28	0.6875	--	16.41	202.89	750,000.0	IM-C592	1	1031	
2-B	20	0.594	40	17.69	205.76	500,000.0	IM-C592	1	294	
M-129	16	0.500	40 (XS)	19.79	212.42	250,000.0	IM-C592	1	660	
M-149	14	0.438	40	18.54	208.51	250,000.0	IM-C592	1	110	
M-118	14	0.438	40	17.97	207.15	500,000.0	IM-C592	1	219	
<b>F I</b> Tesis Profesional			Descripción: Colector de mezcla No. 2. Unidad 2. Alternativa " D ".						Hoja No. 1 de. 1	

Numero de Linea	Diámetro Nominal (pulgadas)	Espesor (pulgadas)	Cedula	Presión (bar)	Temp. (°C)	Flujo (Kg/h)	Aislamiento		Longitud (m)	
							Tipo	Espesor (pulgadas)		
3-A	34	0.875	--	15.52	199.88	1'250,000.0	IM-C592	1	506	
3-B	30	0.6875	--	16.93	204.34	1'000,000.0	IM-C592	1	687	
3-C	24	0.688	40	17.95	207.15	750,000.0	IM-C592	1	274	
3-D	20	0.594	40	19.26	209.84	500,000.0	IM-C592	1	306	
T-328	14	0.438	40	20.79	213.67	250,000.0	IM-C592	1	358	
T-398	14	0.438	40	19.92	212.42	250,000.0	IM-C592	1	157	
M-115	14	0.438	40	20.60	213.67	250,000.0	IM-C592	1	481	
T-350	14	0.438	40	18.12	207.15	250,000.0	IM-C592	1	160	
M-122	14	0.438	40	16.38	202.89	250,000.0	IM-C592	1	100	
<b>FI</b> Tesis Profesional			Descripción: Colector de mezcla No. 3. Unidad 2. Alternativa " D ".						Hoja No. 1 de 1	

## CONCLUSIONES

De las cuatro alternativas presentadas en el Capítulo 5 la más económica en el estudio a valor presente es la Alternativa A, que consiste en que los dos pasos de evaporación-separación se realicen a pie de pozo con una conducción por medio de colectores de alta y baja presión, hacia la casa de máquinas. El valor presente es menor debido a que las tuberías de vapor casi no están sujetas a incrustación, teniendo una vida útil más larga sin la necesidad de una reinversión, cosa que no ocurre con las líneas de líquido separado y mezcla; ya que debido a la intensa incrustación a que están sujetas su vida útil es menor.

En la figura 6.1 se muestra la inversión inicial de cada una de las alternativas, se nota que el costo del equipo de separación es también menor en la Alternativa A. Ya que los costos de los equipos y materiales involucrados en cada una de las alternativas fueron calculados de la misma manera para todas ellas, el costo relativo de una respecto a las otras permanecerá constante.



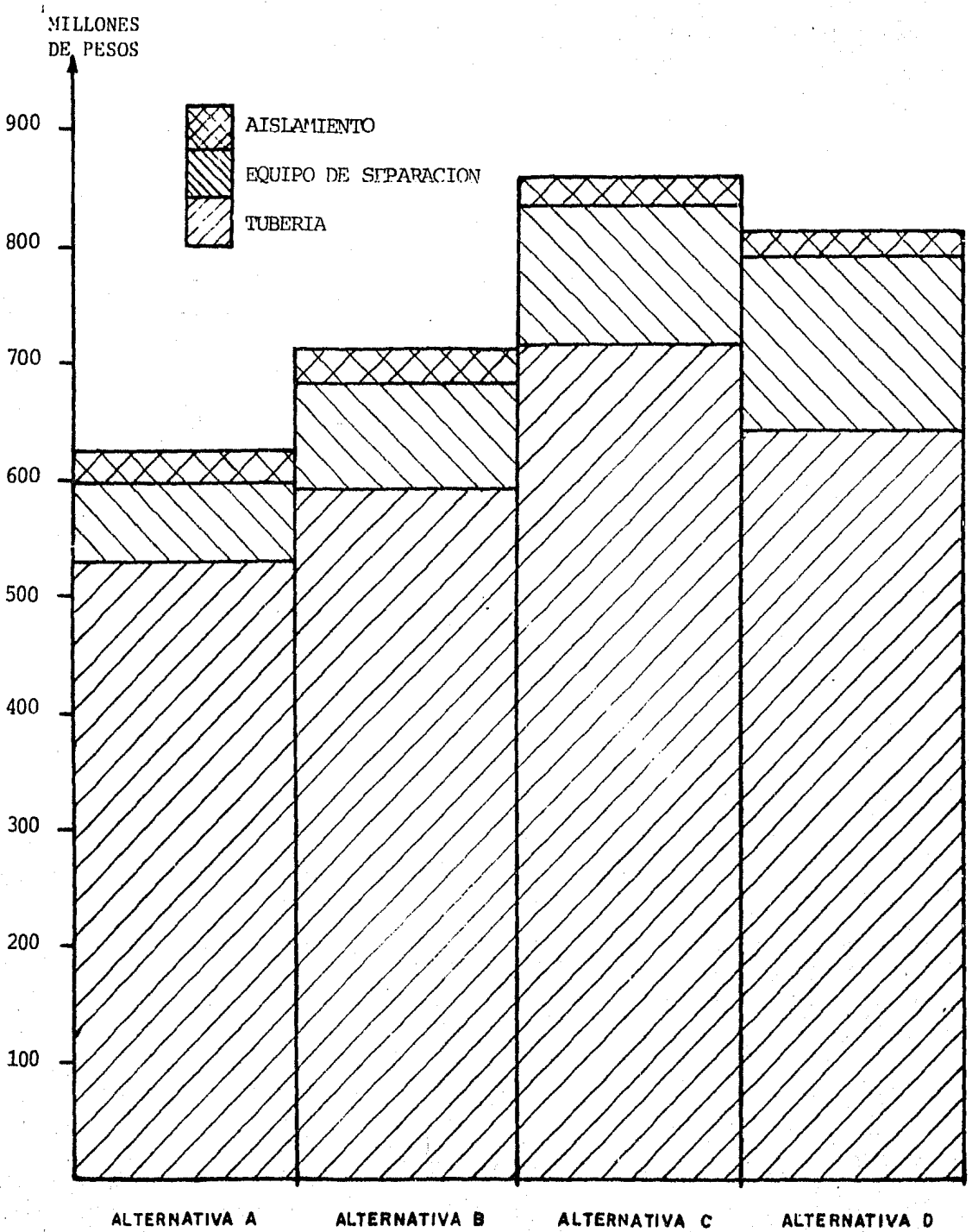


Fig. 6.1 Costo de la inversión inicial de cada alternativa.

Cabe mencionar que el dimensionamiento de las alternativas presentadas en el Capítulo 5, partió de establecer un arreglo geométrico de tubería, dimensionando después la tubería conductora, independientemente de la optimización del balance térmico; ya que se dimensionó el sistema para garantizar los flujos y presiones requeridas en la entrada de la turbina.

Los métodos y recomendaciones presentadas en este trabajo son una recopilación de experiencias desarrolladas en la operación de diversos campos geotérmicos en el mundo ( Wairakei en Nueva Zelanda, Otake y Hatchobaru en Japón y Cerro Prieto en México ) y consideramos que con la ayuda de métodos computacionales podría mejorarse este trabajo, llevando a cabo un análisis del sistema completo, que involucre, caída de presión, pérdida de calor, presiones de separación, que calcule una y otra vez el balance térmico para determinar la generación de energía con diferentes ubicaciones relativas de los equipos de separación, hasta encontrar el óptimo del sistema completo, tanto en su rendimiento termodinámico como en su costo.

## PROGRAMA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LINEAS CONDUCTORAS DE VAPOR SATURADO.

### A.1 RESUMEN DEL PROGRAMA.

Soluciona problemas de dimensionamiento de tuberías que conducen vapor saturado.

Está diseñado para obtener primero un diámetro que garantice las condiciones de flujo, y después ajustando a un diámetro comercial obtener la caída de presión real y la velocidad real en la tubería. Para encontrar el factor de fricción se recurrió a la solución de la ecuación de Colebrook por el método de Newton-Raphson, eliminando el uso del Diagrama de Moody. Todos los cálculos desarrollados por el programa están en sistema de unidades internacional. Contiene métodos para el cálculo de la caída de presión en accesorios suministrando únicamente el coeficiente de pérdida K.

Los datos necesarios y las incógnitas encontradas son las siguientes:

a) Cálculo de  $D$  ( m ) y  $V$  ( m/s ).

Dados:

$$g = 9.806 \text{ m/s}^2$$

$T_{\text{sat}}$  = Temperatura de saturación [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\epsilon$  = Rugosidad absoluta [ m ]

$v_g$  = Volumen específico del vapor [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

$L$  = Longitud [ m ]

$W$  = Gasto másico de vapor [ kg/h ]

$\Delta P$  = Caída de presión requerida [ bar ]

$K$  = Suma de coeficientes de pérdida

b) Cálculo de  $\Delta P$  ( bar ) y  $V$  ( m/s ).

Dados:

$$g = 9.806 \text{ m/s}^2$$

$T_{\text{sat}}$  = Temperatura de saturación [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\epsilon$  = Rugosidad absoluta [ m ]

$v_g$  = Volumen específico del vapor [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

$L$  = Longitud [ m ]

$D$  = Diámetro interior [ m ]

$W$  = Gasto másico de vapor [ kg/h ]

$K$  = Suma de coeficientes de pérdida

PASO	PROCEDIMIENTO	INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	MEMORIAS
1	Introducir Programa				00
2	Introducir Propiedades				01 K
	g	9.806	A'	9.806	02 $H_f$
	$v_g$	$v_g$	D'	$v_g$ ( $m^3/kg$ )	03 $L_{Tot}$
	$T_s$	$T_s$	B'	$T_s$ ( $^{\circ}C$ )	04 D
	$\epsilon$	$\epsilon$	C'	$\epsilon$ ( m )	05 V
3	Introducir Variables Conocidas				06 Q
	K	K	A	K	07 g
	L	L	C	L ( m )	08 v
	$\Delta P$	$\Delta P$	B	$\Delta P$ ( bar )	09 $\epsilon$
	$\circ D$ }	$\circ D$ }	D	$\circ D$ ( m. ) }	10 $1/f$
	W	W	E	Q ( $m^3/s$ )	11 f
4	Calcular Incógnita				12 Re
	Encontrar D	0	D	D ( m )	13 A
	Encontrar $\Delta P$	0	B	$\Delta P$ ( bar )	14 B
					15 $f v^2/2g$
					16 $v_g$

## A.2. EJEMPLO DE UTILIZACION.

Se requiere conducir 110,000 kg/h de vapor saturado a 192 °C a lo largo de 550 m, con una caída de presión disponible de 0.65 bar.

- 1) Determinar el diámetro que permita conducir el flujo sin rebasar la caída de presión disponible.
- 2) Ajustar a diámetro comercial y calcular la caída de presión real y la velocidad real.

Solución.

Datos:

$$v_g = 0.15011 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ ( de tabla de vapor )}$$

$$\epsilon = 0.000045 \text{ m ( de " Flow of Fluids ", Crane, para acero comercial )}$$

$$T_s = 192 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$g = 9.806 \text{ m/s}^2$$

$$K = 0 \text{ ( no se introduce al programa )}$$

$$\Delta P_{\text{requerida}} = 0.65 \text{ bar}$$

$$L = 550 \text{ m}$$

$$W = 110,000 \text{ kg/h}$$

INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	COMENTARIO
0	RST	0	RESET FLAGS
0.15011	D'	0.15011	$v$ ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )
0.000045	C'	0.000045	$\epsilon$ ( m )
192	B'	2.4587829 -6	$T_s$ (°C) $\mu_v$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
9.806	A'	9.806	$g$ ( $\text{m/s}^2$ )
0.65	B	995.0183561	$\Delta P$ (bar) $H_f$ (m)
550	C	550	
110,000	E	4.586694444	$W$ (kg/h) $\Omega$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
	CLR		
	D	( 2.015754044 )	$\Delta X$ calculado para
		( -0.0642051879 )	cada iteración

INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	COMENTARIO
	R/S	( 0.0018821336 ) ( -0.0000553119 ) 0.4128289238  34.26628401	D (m) (16.2531 plg)  V ( m/s ) Se borra el display y se ajusta el diámetro a un valor comercial. ( Cédula 40 para el ejemplo )
0.4286504	CLR D	0.4286504	D= 16.876 x 0.0254 = 0.4286504 m Diámetro interior tubería 18 plg cédula 40.
	B	( 0.02446237 ) ( 0.000000501 )	Con las constantes y propiedades ya introducidas se calcula la $\Delta P$ real y la velocidad real.
	R/S	( 819.9756498 ) 0.5356526029  31.78362744	$H_f$ ( m ) $\Delta P_{real}$ ( bar )  $V_{real}$ ( m/s )

000	79	LBL	060	03	3	120	08	8
001	11	R	061	94	+/-	121	65	x
002	42	STD	062	85	+	122	43	RCL
003	01	01	063	01	1	123	03	03
004	86	STF	064	95	=	124	65	x
005	01	01	065	65	x	125	43	RCL
006	91	R/S	066	07	7	126	06	06
007	76	LBL	067	93	.	127	33	X <sup>2</sup>
008	12	B	068	04	4	128	55	+
009	65	x	069	02	2	129	89	π
010	43	RCL	070	08	8	130	33	X <sup>2</sup>
011	16	16	071	08	8	131	55	+
012	65	x	072	52	EE	132	43	RCL
013	01	1	073	06	6	133	07	07
014	52	EE	074	94	+/-	134	55	+
015	05	5	075	65	x	135	43	RCL
016	55	+	076	43	RCL	136	02	02
017	43	RCL	077	16	16	137	54	)
018	07	07	078	95	=	138	45	Y <sup>x</sup>
019	95	=	079	42	STD	139	33	.
020	42	STD	080	08	08	140	02	2
021	02	02	081	91	R/S	141	54	)
022	22	INV	082	76	LBL	142	42	STD
023	52	EE	083	18	C'	143	04	04
024	43	RCL	084	42	STD	144	22	INV
025	02	02	085	09	09	145	87	IFF
026	29	CP	086	91	R/S	146	01	01
027	67	EQ	087	76	LBL	147	32	X↑T
028	43	RCL	088	15	E	148	53	(
029	91	R/S	089	65	x	149	43	RCL
030	76	LBL	090	43	RCL	150	01	01
031	13	C	091	16	16	151	65	x
032	42	STD	092	55	+	152	43	RCL
033	03	03	093	03	3	153	04	04
034	91	R/S	094	06	6	154	55	+
035	76	LBL	095	00	0	155	43	RCL
036	14	D	096	00	0	156	11	11
037	29	CP	097	95	=	157	54	)
038	67	EQ	098	42	STD	158	44	SUM
039	30	TAN	099	06	06	159	33	03
040	86	STF	100	91	R/S	160	76	LBL
041	02	02	101	76	LBL	161	32	X↑T
042	42	STD	102	19	D'	162	02	2
043	04	04	103	42	STD	163	01	1
044	91	R/S	104	16	16	164	00	0
045	76	LBL	105	91	R/S	165	00	0
046	16	A'	106	76	LBL	166	32	X↑T
047	42	STD	107	30	TAN	167	53	(
048	07	07	108	07	7	168	04	4
049	91	R/S	109	42	STD	169	65	x
050	76	LBL	110	10	10	170	43	RCL
051	17	B'	111	76	LBL	171	06	06
052	65	x	112	35	1/X	172	55	+
053	06	6	113	53	(	173	43	RCL
054	93	.	114	53	(	174	08	08
055	02	2	115	43	RCL	175	55	+
056	07	7	116	10	10	176	99	π
057	05	5	117	35	1/X	177	55	+
058	06	6	118	33	X <sup>2</sup>	178	43	RCL
059	52	EE	119	65	x	179	04	04



180	54	)	240	34	FX	300	43	RCL
181	42	STD	241	65	x	301	10	10
182	12	12	242	43	RCL	302	35	1/X
183	22	INV	243	10	10	303	33	X²
184	77	GE	244	54	)	304	42	STD
185	33	X²	245	42	STD	305	11	11
186	71	SBR	246	05	05	306	51	GTD
187	53	(	247	43	RCL	307	54	)
188	61	GTD	248	10	10	308	76	LBL
189	42	STD	249	35	1/X	309	45	YX
190	76	LBL	250	33	X²	310	53	(
191	33	X²	251	42	STD	311	06	6
192	53	(	252	11	11	312	04	4
193	43	RCL	253	43	RCL	313	55	÷
194	12	12	254	04	04	314	43	RCL
195	34	FX	255	91	R/S	315	12	12
196	55	÷	256	43	RCL	316	54	)
197	08	8	257	05	05	317	42	STD
198	54	)	258	91	R/S	318	11	11
199	53	(	259	76	LBL	319	75	LBL
200	24	CE	260	43	RCL	320	54	)
201	75	-	261	53	(	321	22	INV
202	32	X:IT	262	04	4	322	37	IFF
203	43	RCL	263	65	x	323	01	01
204	10	10	264	43	RCL	324	55	÷
205	54	)	265	06	06	325	53	(
206	50	I×I	266	55	÷	326	43	RCL
207	66	PAU	267	89	#	327	01	01
208	66	PAU	268	55	÷	328	65	x
209	32	X:IT	269	43	RCL	329	43	RCL
210	42	STD	270	04	04	330	04	04
211	10	10	271	33	X²	331	55	÷
212	93	.	272	54	)	332	43	RCL
213	00	0	273	42	STD	333	11	11
214	00	0	274	05	05	334	54	)
215	01	1	275	76	LBL	335	44	SUM
216	32	X:IT	276	65	x	336	03	03
217	22	INV	277	53	(	337	75	LBL
218	77	GE	278	43	RCL	338	55	÷
219	42	STD	279	04	04	339	53	(
220	61	GTD	280	65	x	340	43	RCL
221	35	1/X	281	43	RCL	341	11	11
222	76	LBL	282	05	05	342	65	x
223	42	STD	283	55	÷	343	43	RCL
224	53	(	284	43	RCL	344	05	05
225	53	(	285	08	08	345	33	X²
226	43	RCL	286	54	)	346	55	÷
227	02	02	287	42	STD	347	02	2
228	65	x	288	12	12	348	55	÷
229	02	2	289	32	X:IT	349	43	RCL
230	65	x	290	02	2	350	07	07
231	43	RCL	291	01	1	351	55	÷
232	07	07	292	00	0	352	43	RCL
233	65	x	293	00	0	353	04	04
234	43	RCL	294	32	X:IT	354	54	)
235	04	04	295	22	INV	355	42	STD
236	55	÷	296	77	GE	356	15	15
237	43	RCL	297	45	YX	357	43	RCL
238	03	03	298	71	SBR	358	15	15
239	54	)	299	53	(	359	65	x

360	43	RCL	420	43	RCL
361	03	03	421	10	10
362	95	=	422	85	+
363	42	STD	423	43	RCL
364	02	02	424	14	14
365	66	PAU	425	54	)
366	65	x	426	28	LDG
367	43	RCL	427	54	)
368	07	07	428	55	÷
369	55	÷	429	53	(
370	43	RCL	430	01	1
371	16	16	431	85	+
372	55	÷	432	02	2
373	05	5	433	65	x
374	22	INV	434	01	1
375	28	LDG	435	22	INV
376	95	=	436	23	LNx
377	91	R/S	437	28	LDG
378	43	RCL	438	65	x
379	05	05	439	43	RCL
380	91	R/S	440	13	13
381	76	LBL	441	55	÷
382	53	(	442	53	(
383	53	(	443	43	RCL
384	53	(	444	13	13
385	43	RCL	445	65	x
386	09	09	446	43	RCL
387	55	÷	447	10	10
388	43	RCL	448	85	+
389	04	04	449	43	RCL
390	54	)	450	14	14
391	55	÷	451	54	)
392	03	3	452	54	)
393	93	.	453	54	)
394	07	7	454	94	+/-
395	54	)	455	44	SUM
396	42	STD	456	10	10
397	14	14	457	66	PAU
398	53	(	458	50	IxI
399	02	2	459	32	XIT
400	93	.	460	93	.
401	05	5	461	00	0
402	01	1	462	00	0
403	55	÷	463	01	1
404	43	RCL	464	32	XIT
405	12	12	465	22	INV
406	54	)	466	77	GE
407	42	STD	467	60	DEG
408	13	13	468	87	IFF
409	53	(	469	02	02
410	53	(	470	53	(
411	43	RCL	471	61	GTD
412	10	10	472	35	1/X
413	95	+	473	76	LBL
414	02	2	474	60	DEG
415	65	x	475	92	RTN
416	53	(	476	00	0
417	43	RCL	477	00	0
418	13	13	478	00	0
419	55	x	479	00	0

## PROGRAMA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE TUBERIAS CONDUCTORAS DE FLUJO BIFASICO.

### B.1 RESUMEN DEL PROGRAMA.

Este programa obtiene la pérdida de presión para flujo en dos fases, en base al método propuesto por Lockhart-Martinelli. Primero obtiene la caída de presión para la fase líquida, con la Ecuación de Darcy y el factor de fricción con base a la solución numérica de la Ecuación de Colebrook, para después ser multiplicados por los factores de Lockhart-Martinelli obteniendo así la caída de presión del flujo en dos fases.

El programa tiene previsto el cálculo de longitudes equivalentes de los accesorios, suministrando únicamente el coeficiente de pérdida de presión K.

Dados:

$v_f$  = Volumen específico del líquido  $[m^3/kg]$

$v_g$  = Volumen específico del gas [ $m^3/kg$ ]

$\mu_L$  = Viscosidad del líquido [ $kg/m\ s$ ]

$\mu_g$  = Viscosidad del gas [ $kg/m\ s$ ]

$x$  = Calidad [decimal]

$W_T$  = Gasto másico de mezcla [ $kg/s$ ]

$K$  = Coeficiente de pérdida de presión

$L$  = Longitud de tubería recta [ $m$ ]

$D$  = Diámetro interior [ $m$ ]

$\epsilon$  = Rugosidad absoluta [ $m$ ]

Obtiene:

$\Delta P$  = Caída de presión de las dos fases [ $bar$ ]

$L$  = Longitud total  $m$

( tramos rectos y accesorios o únicamente accesorios )

PASO	PROCEDIMIENTO	INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	MEMORIAS
1	Introducir Programa				00 x
2	Introducir Propiedades				01 K
	$v_f$	$v_f$	A'	$v_f$ ( m <sup>3</sup> /kg )	02 $\Delta P$
	$v_g$	$v_g$	R/S	$v_g$ ( m <sup>3</sup> /kg )	03 L
	$\mu_L$	$\mu_L$	B'	$\mu_L$ ( kg/m s )	04 D
	$\mu_g$	$\mu_g$	R/S	$\mu_g$ ( kg/m s )	05 $v_L$
	x	x	C'	x ( decimal )	06 $W_T$
	$W_T$	$W_T$	D'	$W_T$ ( kg/s )	07 $v_f$
	K	K	E'	K	08 $v_g$
	L	L	A	L ( m )	09 $\epsilon$
	D	D	B	D ( m )	10 1/ f
	$\epsilon$	$\epsilon$	R/S	$\epsilon$ ( m )	11 f
3	Calcular la Caída de Presión		CLR		12 Re
			C		13 A
				$\Delta P$ ( bar )	14 B
					15 $\mu_L$
					16 $\mu_g$
					17 $\chi$
					18 $\phi^2$
					19 $T_s$
					20 $Q_T$

## B.2 EJEMPLO DE UTILIZACION.

1) Una tubería de 14 plg nominal standard de 20 m de largo ( tramo recto ) conduce vapor a 10 bar y con las siguientes propiedades.

$$x = 30\%$$

$$W_T = 250,000 \text{ kg/h}$$

Calcular la caída de presión para flujo bifásico según el método de Lockhart-Martinelli.

Solución.

De tablas de vapor a 10 bar:

$$v_f = 0.0011273 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g = 0.19444 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\mu_L = 1.485 \times 10^{-4} \text{ kg/m s}$$

$$\mu_g = 1.582 \times 10^{-5} \text{ kg/m s}$$

$$\text{Diámetro interior de la tubería} = 0.3365 \text{ m}$$

INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	COMENTARIO
	RST		RESET FLAGS
0.0011273	A'	0.0011273	$v_f$ ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )
0.19444	R/S	0.19444	$v_g$ ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )
$1.485 \times 10^{-4}$	B'	$1.485 \times 10^{-4}$	$\mu_L$ ( $\text{kg/m s}$ )
$1.582 \times 10^{-5}$	R/S	$1.582 \times 10^{-5}$	$\mu_g$ ( $\text{kg/m s}$ )
0.3	C'	0.3	x ( decimal )
69.4444444	D'	69.4444444	$W_T$ ( $\text{kg/s}$ )
20	A	20	L ( m )
0.3365	B	0.3365	D ( m )
0.000045	R/S	0.000045	e ( m )
	CLR		
	C	( 0.0439858266 )	
		( 0.0000011716 )	
		0.1685478053	$\Delta P$ ( bar )

2) Sea un codo de radio largo ( $r/D = 1.5$ ), con un coeficiente de pérdida de presión de  $K = 0.2$ . Encontrar la longitud equivalente así como la pérdida de presión. Las propiedades del fluido son las mismas del ejemplo 1.

INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	COMENTARIO
	RST		RESET FLAGS
0.0011273	A'	0.0011273	$v_f$ ( m <sup>3</sup> /kg )
0.19444	R/S	0.19444	$v_g$ ( m <sup>3</sup> /kg )
$1.485 \times 10^{-4}$	B'	$1.485 \times 10^{-4}$	$\mu_L$ ( kg/m s )
$1.582 \times 10^{-5}$	R/S	$1.582 \times 10^{-5}$	$\mu_g$ ( kg/m s )
0.3	C'	0.3	x ( decimal )
69.4444444	D'	69.4444444	$W_T$ ( kg/s )..
0.2	E'	0.2	K
0.3365	B	0.3365	D ( m )
0.000045	R/S	0.000045	$\epsilon$ ( m )
	CLR		
	C		
		( 0.0439858266 )	
		( 0.0000011716 )	
		0.0414027633	$\Delta P$ ( bar )
	RCL 03		
		4.91288074	$L_{EQ}$ ( m )

000	76	LBL	060	43	RCL	120	54	)
001	16	A'	061	00	00	121	42	STD
002	42	STD	062	54	)	122	13	13
003	07	07	063	65	x	123	76	LBL
004	91	R/S	064	43	RCL	124	53	(
005	42	STD	065	06	06	125	53	(
006	08	08	066	65	x	126	53	(
007	91	R/S	067	43	RCL	127	43	RCL
008	76	LBL	068	07	07	128	10	10
009	17	E'	069	65	x	129	85	+
010	42	STD	070	04	4	130	02	2
011	15	15	071	54	)	131	65	x
012	91	R/S	072	55	+	132	53	(
013	42	STD	073	53	(	133	43	RCL
014	16	16	074	43	RCL	134	13	13
015	91	R/S	075	04	04	135	65	x
016	76	LBL	076	33	X2	136	43	RCL
017	18	C'	077	65	x	137	10	10
018	42	STD	078	89	n	138	85	+
019	00	00	079	54	)	139	43	RCL
020	08	8	080	54	)	140	14	14
021	93	.	081	42	STD	141	54	)
022	05	5	082	05	05	142	28	LDG
023	42	STD	083	65	x	143	54	)
024	10	10	084	43	RCL	144	55	+
025	43	RCL	085	04	04	145	53	(
026	00	00	086	55	+	146	01	1
027	91	R/S	087	53	(	147	85	+
028	76	LBL	088	43	RCL	148	02	2
029	19	D'	089	07	07	149	65	x
030	42	STD	090	65	x	150	53	(
031	06	06	091	43	RCL	151	01	1
032	91	R/S	092	15	15	152	22	INV
033	76	LBL	093	54	)	153	23	LNx
034	10	E'	094	95	=	154	28	LDG
035	42	STD	095	42	STD	155	54	)
036	01	01	096	12	12	156	65	x
037	86	STF	097	53	(	157	43	RCL
038	01	01	098	53	(	158	13	13
039	91	R/S	099	43	RCL	159	55	+
040	76	LBL	100	09	09	160	53	(
041	11	A	101	55	+	161	43	RCL
042	42	STD	102	43	RCL	162	13	13
043	03	03	103	04	04	163	65	x
044	91	R/S	104	54	)	164	43	RCL
045	76	LBL	105	55	+	165	10	10
046	12	B	106	03	3	166	85	+
047	42	STD	107	93	.	167	43	RCL
048	04	04	108	07	7	168	14	14
049	91	R/S	109	54	)	169	54	)
050	42	STD	110	42	STD	170	54	)
051	09	09	111	14	14	171	54	)
052	91	R/S	112	53	(	172	94	+/-
053	76	LBL	113	02	2	173	44	SUM
054	13	C	114	93	.	174	10	10
055	53	(	115	05	5	175	66	PAU
056	53	(	116	01	1	176	66	PAU
057	53	(	117	55	+	177	50	IX1
058	01	1	118	43	RCL	178	32	X:T
059	75	-	119	12	12	179	93	.



180	00	0	240	45	YX	300	22	INV
181	00	0	241	93	.	301	28	LDG
182	01	1	242	09	9	302	95	=
183	32	XIT	243	54	)	303	42	STD
184	22	INV	244	65	x	304	02	02
185	77	GE	245	53	(	305	91	R/S
186	52	EE	246	43	RCL	306	00	0
187	61	GTD	247	07	07	307	00	0
188	53	(	248	55	+	308	00	0
189	76	LBL	249	43	RCL	309	00	0
190	52	EE	250	08	08	310	00	0
191	43	RCL	251	54	)	311	00	0
192	10	10	252	34	FX	312	00	0
193	35	1/X	253	95	=	313	00	0
194	33	X <sup>2</sup>	254	42	STD	314	00	0
195	42	STD	255	17	17	315	00	0
196	11	11	256	33	X <sup>2</sup>	316	00	0
197	22	INV	257	35	1/X	317	00	0
198	87	IFF	258	85	+	318	00	0
199	01	01	259	53	(	319	00	0
200	55	+	260	02	2	320	00	0
201	53	(	261	00	0	321	00	0
202	43	RCL	262	55	+	322	00	0
203	01	01	263	43	RCL	323	00	0
204	65	x	264	17	17	324	00	0
205	43	RCL	265	54	)	325	00	0
206	04	04	266	85	+	326	00	0
207	55	+	267	01	1			
208	43	RCL	268	95	=			
209	11	11	269	42	STD			
210	54	)	270	18	18			
211	44	SUM	271	53	(			
212	03	03	272	53	(			
213	76	LBL	273	43	RCL			
214	55	+	274	05	05			
215	53	(	275	33	X <sup>2</sup>			
216	53	(	276	65	x			
217	43	RCL	277	43	RCL			
218	15	15	278	11	11			
219	55	+	279	65	x			
220	43	RCL	280	43	RCL			
221	16	16	281	03	03			
222	54	)	282	54	)			
223	45	YX	283	55	+			
224	93	.	284	53	(			
225	01	1	285	02	2			
226	54	)	286	65	x			
227	65	x	287	43	RCL			
228	53	(	288	07	07			
229	53	(	289	65	x			
230	53	(	290	43	RCL			
231	01	1	291	04	04			
232	75	-	292	34	)			
233	43	RCL	293	54	)			
234	00	00	294	65	x			
235	54	)	295	43	RCL			
236	55	+	296	13	18			
237	43	RCL	297	95	=			
238	00	00	298	55	+			
239	54	)	299	05	5			

## PROGRAMA PARA EL CALCULO DEL AISLAMIENTO TERMICO REQUERIDO Y SOLIDOS TOTALES EN EL VAPOR.

### C.1 RESUMEN DEL PROGRAMA.

Este programa se compone de dos partes, que pueden utilizarse en forma separada o en conjunto.

La primera parte calcula el espesor del aislamiento requerido para obtener una temperatura superficial requerida y el calor transferido por unidad de área.

Dados:

$T_1$  = Temperatura del fluido en la tubería [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_2$  = Temperatura ambiente de diseño [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{os}$  = Temperatura máxima superficial del aislamiento [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$D_1$  = Diámetro exterior de la tubería [m]

$k$  = Coeficiente de conductividad térmica [ $\text{kJ m/s m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ]

Obtiene:

$e$  = Espesor del aislamiento [ m ]

$T_{oc}$  = Temperatura real superficial del aislamiento [ °C ]

$q$  = Calor perdido por unidad de área [ kJ/s m<sup>2</sup> ]

$Q/L$  = Calor perdido por unidad de longitud [ kJ/s m ]

El programa aumenta el espesor del aislamiento en tramos de 1/2 plg en 1/2 plg, hasta encontrar una temperatura superficial que sea menor que la requerida.

La segunda parte del programa calcula la cantidad de sólidos totales presentes en el vapor y en el condensado formado en un vaporducto a lo largo de su trayectoria, y estima la precipitación de los sólidos en el condensado.

Dados:

$Q/L$  = Flujo de calor por unidad de longitud [ kJ/s m ]

( Puede ser resultado de la primera parte del programa o dato suministrado ).

$L$  = Longitud del tramo de tubería [ m ]

$ppm_i$  = Partes por millón de químicos disueltos iniciales en la tubería [ ppm ]

$h_T$  = Entalpía total inicial [ kJ/kg ]

$W_T$  = Flujo másico total en la tubería [ kg/s ]

$x$  = Calidad inicial del vapor

$h_f$  = Entalpía del líquido saturado al final del tramo considerado [ kJ/kg ]

$h_{fg}$  = Entalpía de vaporización al final del tramo considerado [ kJ/kg ]

Obtiene:

$AE$  = Cantidad de agua extraída en el orificio de control [ kg/s ]

$ppm_f$  = Partes por millón al final del tramo considerado [ ppm ]

PARTE I DEL PROGRAMA.

PASO	PROCEDIMIENTO	INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	MEMORIAS
1	Introducir Programa				00
2	Introducir Datos				01 $T_1$
	$T_1$	$T_1$	A'	$T_1$ ( °C )	02 $T_2$
	$T_2$	$T_2$	R/S	$T_2$ ( °C )	03 $T_{os}$
	$T_{os}$	$T_{os}$	R/S	$T_{os}$ ( °C )	04 $D_1$
	$D_1$	$D_1$	B	$D_1$ ( m )	05 k
	k	k	R/S	k ( kJ m/s m <sup>2</sup> °C )	06 $\theta$
3	Calcular Espesor		CLR		07 $D_o$
			C'		08 h
				e ( m )	09 ER
			R/S	$T_{oc}$ ( °C )	10 q
4	Calcular Flujo de Calor				11 $T_{oc}$
			D	Q/L ( kJ/s m )	12 e
					13 R
					14 Q/L
					15 $W_T$
					16 $W_{f1}$
					17 $W_{f2}$
					18 x
					19 $h_T$
					20 $h_f$
					21 $h_{fg}$
					22 ppm
					23 L

PARTE II DEL PROGRAMA				DISPLAY	MEMORIAS
PASO	PROCEDIMIENTO	INTRODUCIR	PRESIONAR		
5	Introducir Datos Iniciales L ppm <sub>i</sub> W <sub>Ti</sub> x <sub>i</sub>	L ppm <sub>i</sub> W <sub>Ti</sub> x <sub>i</sub>	A R/S B R/S	L ( m ) ppm <sub>i</sub> ( ppm ) W <sub>Ti</sub> ( kg/s ) x <sub>i</sub> ( decimal )	24 Q 25 AF
6	Introducir Entalpías al Final del Tramo h <sub>f</sub> h <sub>fg</sub> Cálculo de AE y ppm	h <sub>f</sub> h <sub>fg</sub>	C R/S CLR D R/S	h <sub>f</sub> ( kJ/kg ) h <sub>fg</sub> ( kJ/kg ) AE ( kg/s ) ppm ( ppm )	
7					
8	Para continuar el cálculo de una línea basta con suministrar las entalpías al final de cada tramo h <sub>f</sub> h <sub>fg</sub> Cálculo de AE y ppm al final del tramo	h <sub>f</sub> h <sub>fg</sub>	C R/S CLR D R/S	h <sub>f</sub> ( kJ/kg ) h <sub>fg</sub> ( kJ/kg ) AE ( kg/s ) ppm ( ppm )	
9					

PARTE I DEL PROGRAMA.

PASO	PROCEDIMIENTO	INTRODUCIR	PRECIONAR	DISPLAY	MEMORIAS
1	Introducir Programa				00
2	Introducir Datos $T_1$ $T_2$ $T_{os}$ $D_1$ $k$	$T_1$ $T_2$ $T_{os}$ $D_1$ $k$	A' R/S R/S B R/S	$T_1$ (°C) $T_2$ (°C) $T_{os}$ (°C) $D_1$ (m) $k$ (kJ m/s m <sup>2</sup> °C)	01 $T_1$ 02 $T_2$ 03 $T_{os}$ 04 $D_1$ 05 $k$ 06 $\theta$ 07 $D_o$ 08 $h$ 09 $XR$ 10 $q$ 11 $T_{oc}$ 12 $e$ 13 $R$ 14 $Q/L$ 15 $W_T$ 16 $W_{F1}$ 17 $W_{F2}$ 18 $x$ 19 $h_T$ 20 $h_e$ 21 $h_{fg}$ 22 $ppm$ 23 $L$
3	Calcular Espesor		CLR C'	$e$ (m) $T_{oc}$ (°C)	
4	Calcular Flujo de Calor		R/S D	$Q/L$ (kJ/s m)	

## C.2 EJEMPLO DE UTILIZACION.

1) Encontrar el espesor del aislamiento que garantice una temperatura superficial de  $32.27\text{ }^{\circ}\text{C}$  si la temperatura ambiente es  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Considere lana mineral con  $k = 4.53483 \times 10^{-5}\text{ kJ m/s m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La tubería tiene un diámetro exterior de  $0.32385\text{ m}$  y el fluido es vapor a  $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Datos:

$$T_1 = 155\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{os} = 32.27\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$D_1 = 0.32385\text{ m}$$

$$k = 4.53483 \times 10^{-5}\text{ kJ m/s m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	COMENTARIO
	RST		RESET FLAGS
155	A'	155	$T_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
10	R/S	10	$T_2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
32.27	R/S	32.27	$T_{os}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
0.32385	B'	0.32385	$D_1$ (m)
$4.53483 \times 10^{-5}$	R/S	$4.53483 \times 10^{-5}$	$k$ ( $\text{kJ m/s m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
	CLR		
	C'	( 0 )	$e_1$ (m)
		( 155 )	$T_{oc1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
		( 0.0127 )	$e_2$ (m)
		( 52.21921654 )	$T_{oc2}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
		( 0.0254 )	$e_3$ (m)
		( 34.27665248 )	$T_{oc3}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
		( 0.0381 )	$e_4$ (m)
		( 26.85058605 )	$T_{oc4}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
		0.0381	$e$ (m)
		26.85058605	$T_{oc}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
	D'	0.1727982407	$Q/L$ ( $\text{kJ/s m}$ )

2) Sea una línea conductora de vapor con las siguientes condiciones iniciales:

$$ppm_1 = 50.124 \text{ en el vapor}$$

$$h_T = 2748.7564 \text{ kJ/kg}$$

$$W_T = 3.679492183 \text{ kg/s}$$

$$x_i = 0.9985$$

$$Q/L = 0.1091810671 \text{ kJ/s m}$$

Cuantos orificios de control a cada 100 m serán necesarios para garantizar que el contenido de químicos en el vapor sea menor de 1 ppm. ( Las entalpías se obtendrán de las tablas de vapor a las presiones de cada uno de los puntos de extracción ).

INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	COMENTARIO
	RST		RESET FLAGS
100	A	100	L ( m )
50.124	R/S	50.124	$ppm_1$ ( vapor )
2748.756412	R/S	2748.756412	$h_{Ti}$ ( kJ/kg )
3.679492183	B	3.679492183	$W_T$ ( kg/s )
0.9985	R/S	0.9985	$x_i$ ( decimal )
647.2031959	C	647.2031959	$h_{f1}$ ( kJ/kg )
2103.393498	R/S	2103.393498	$h_{fg1}$ ( kJ/kg )
	CLR		
	D	0.0042049692	$AE_1$ ( kg/s )
	R/S		
		32.89516388	$ppm_1$ ( vapor )
			Únicamente se introducen las nuevas entalpías.
641.9519184	C	641.9519184	$h_{f2}$ ( kJ/kg )
2107.220556	R/S	2107.220556	$h_{fg2}$ ( kJ/kg )
		0.0034472888	$AE_2$ ( kg/s )
	R/S		
		20.06259939	$ppm_2$ ( vapor )



INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	COMENTARIO
636.5708079	C	636.5708079	$h_{f3}$ ( kJ/kg )
2111.065288	R/S	2111.065288	$h_{fg3}$ ( kJ/kg )
	CLR		
	D		
		0.0029702939	$AE_3$ ( kg/s )
	R/S		
		11.64221071	$ppm_3$ ( vapor )
631.0433475	C	631.0433475	$h_{f4}$ ( kJ/kg )
2115.085437	R/S	2115.085437	$h_{fg4}$ ( kJ/kg )
	CLR		
	D		
		0.0027560263	$AE_4$ ( kg/s )
	R/S		
		6.273667976	$ppm_4$ ( vapor )
625.3636764	C	625.3636764	$h_{f5}$ ( kJ/kg )
2119.194532	R/S	2119.194532	$h_{fg5}$ ( kJ/kg )
	CLR		
	D		
		0.0025928312	$AE_5$ ( kg/s )
	R/S		
		3.334269089	$ppm_5$ ( vapor )
619.5299466	C	619.5299466	$h_{f6}$ ( kJ/kg )
2123.307773	R/S	2123.307773	$h_{fg6}$ ( kJ/kg )
	CLR		
	D		
		0.0023806662	$AE_6$ ( kg/s )
	R/S		
		1.815709614	$ppm_6$ ( vapor )
613.5251691	C	613.5251691	$h_{f7}$ ( kJ/kg )
2127.581233	R/S	2127.581233	$h_{fg7}$ ( kJ/kg )
	CLR		
	D		
		0.0022641668	$AE_7$ ( kg/s )
	R/S		
		0.9545671203	$ppm_7$ ( vapor )

000	75	LBL	060	53	(	120	53	(
001	11	A	061	43	RCL	121	53	(
002	42	STD	062	19	19	122	43	RCL
003	23	23	063	75	-	123	16	16
004	55	x	064	43	RCL	124	55	÷
005	43	RCL	065	20	20	125	43	RCL
006	14	14	066	54	)	126	15	15
007	95	=	067	55	÷	127	54	)
008	42	STD	068	43	RCL	128	94	+/-
009	24	24	069	21	21	129	95	+
010	43	RCL	070	54	)	130	01	1
011	23	23	071	42	STD	131	54	)
012	91	R/S	072	18	18	132	42	STD
013	42	STD	073	53	(	133	18	18
014	22	22	074	53	(	134	53	(
015	91	R/S	075	01	1	135	53	(
016	42	STD	076	75	-	136	43	RCL
017	19	19	077	43	RCL	137	21	21
018	91	R/S	078	18	18	138	65	x
019	76	LBL	079	54	)	139	43	RCL
020	12	B	080	65	x	140	18	18
021	42	STD	081	43	RCL	141	54	)
022	15	15	082	15	15	142	85	+
023	91	R/S	083	54	)	143	43	RCL
024	42	STD	084	42	STD	144	20	20
025	18	18	085	17	17	145	54	)
026	94	+/-	086	65	x	146	42	STD
027	85	+	087	93	.	147	19	19
028	01	1	088	08	8	148	43	RCL
029	95	=	089	05	5	149	22	22
030	65	x	090	95	=	150	91	R/S
031	43	RCL	091	42	STD	151	75	LBL
032	15	15	092	25	25	152	16	A'
033	95	=	093	91	R/S	153	42	STD
034	42	STD	094	53	(	154	01	01
035	16	16	095	43	RCL	155	91	R/S
036	43	RCL	096	22	22	156	42	STD
037	18	18	097	65	x	157	02	02
038	91	R/S	098	43	RCL	158	91	R/S
039	76	LBL	099	16	16	159	42	STD
040	13	C	100	55	÷	160	03	03
041	42	STD	101	43	RCL	161	32	XIT
042	20	20	102	17	17	162	43	RCL
043	91	R/S	103	54	)	163	03	03
044	42	STD	104	42	STD	164	91	R/S
045	21	21	105	22	22	165	76	LBL
046	91	R/S	106	43	RCL	166	17	B'
047	76	LBL	107	17	17	167	42	STD
048	14	D	108	65	x	168	04	04
049	53	(	109	93	.	169	91	R/S
050	43	RCL	110	01	1	170	42	STD
051	24	24	111	05	5	171	05	05
052	55	÷	112	95	=	172	91	R/S
053	43	RCL	113	42	STD	173	76	LBL
054	15	15	114	16	16	174	18	C'
055	54	)	115	43	RCL	175	53	(
056	22	INV	116	25	25	176	43	RCL
057	44	SUM	117	22	INV	177	03	03
058	19	19	118	44	SUM	178	75	-
059	53	(	119	15	15	179	43	RCL

180 02 02  
 181 34 )  
 182 41 STD  
 183 06 06  
 184 LBL  
 185 =  
 186 53 ( )  
 187 53 ( )  
 188 43 RCL  
 189 12 12  
 190 56 FAU  
 191 56 FAU  
 192 \* 2  
 193 )  
 194 54 +  
 195 85 +  
 196 48 RCL  
 197 04 04  
 198 44 44  
 199 44 44  
 200 44 44  
 201 44 44  
 202 44 44  
 203 44 44  
 204 44 44  
 205 44 44  
 206 44 44  
 207 44 44  
 208 09 09  
 209 34 34  
 210 05 05  
 211 05 05  
 212 05 05  
 213 05 05  
 214 05 05  
 215 05 05  
 216 05 05  
 217 05 05  
 218 05 05  
 219 05 05  
 220 05 05  
 221 05 05  
 222 05 05  
 223 05 05  
 224 05 05  
 225 05 05  
 226 05 05  
 227 05 05  
 228 05 05  
 229 05 05  
 230 05 05  
 231 05 05  
 232 05 05  
 233 05 05  
 234 05 05  
 235 05 05  
 236 05 05  
 237 05 05  
 238 05 05  
 239 05 05  
 240 05 05  
 241 05 05  
 242 05 05  
 243 05 05  
 244 05 05  
 245 05 05  
 246 05 05  
 247 05 05  
 248 05 05  
 249 05 05  
 250 05 05  
 251 05 05  
 252 05 05  
 253 05 05  
 254 05 05  
 255 05 05  
 256 05 05  
 257 05 05  
 258 05 05  
 259 05 05  
 260 05 05  
 261 05 05  
 262 05 05  
 263 05 05  
 264 05 05  
 265 05 05  
 266 05 05  
 267 05 05  
 268 05 05  
 269 05 05  
 270 05 05  
 271 05 05  
 272 05 05  
 273 05 05  
 274 05 05  
 275 05 05  
 276 05 05  
 277 05 05  
 278 05 05  
 279 05 05  
 280 05 05  
 281 05 05  
 282 05 05  
 283 05 05  
 284 05 05  
 285 05 05  
 286 05 05  
 287 05 05  
 288 05 05  
 289 05 05  
 290 05 05  
 291 05 05  
 292 05 05  
 293 05 05  
 294 05 05  
 295 05 05  
 296 05 05  
 297 05 05  
 298 05 05  
 299 05 05

240 02 2  
 241 02 2  
 242 95 =  
 243 42 STD  
 244 08 08  
 245 53 ( )  
 246 43 RCL  
 247 07 07  
 248 55 +  
 249 43 RCL  
 250 04 04  
 251 54 )  
 252 23 LNX  
 253 55 +  
 254 43 RCL  
 255 05 05  
 256 65 x  
 257 43 RCL  
 258 07 07  
 259 55 +  
 260 02 2  
 261 95 =  
 262 42 STD  
 263 13 13  
 264 85 +  
 265 43 RCL  
 266 38 08  
 267 35 1/X  
 268 95 =  
 269 42 STD  
 270 09 09  
 271 53 ( )  
 272 53 ( )  
 273 43 RCL  
 274 01 01  
 275 75 -  
 276 43 RCL  
 277 02 02  
 278 54 )  
 279 55 +  
 280 43 RCL  
 281 09 09  
 282 54 )  
 283 42 STD  
 284 10 10  
 285 53 ( )  
 286 43 RCL  
 287 01 01  
 288 75 -  
 289 53 ( )  
 290 43 RCL  
 291 10 10  
 292 55 x  
 293 43 RCL  
 294 13 13  
 295 54 )  
 296 54 )  
 297 42 STD  
 298 11 11  
 299 66 PAU

300 66 PAU  
 301 22 INV  
 302 77 GE  
 303 35 +  
 304 93 .  
 305 00 0  
 306 01 1  
 307 32 2  
 308 07 7  
 309 44 SUM  
 310 12 12  
 311 51 GTD  
 312 95 =  
 313 75 LBL  
 314 85 +  
 315 43 RCL  
 316 12 12  
 317 91 R/S  
 318 43 RCL  
 319 11 11  
 320 91 R/S  
 321 76 LBL  
 322 19 D'  
 323 53 ( )  
 324 43 RCL  
 325 10 10  
 326 65 x  
 327 89 1  
 328 55 x  
 329 43 RCL  
 330 07 07  
 331 54 )  
 332 42 STD  
 333 14 14  
 334 00 0  
 335 42 STD  
 336 12 12  
 337 43 RCL  
 338 14 14  
 339 91 R/S  
 340 00 0  
 341 00 0  
 342 00 0  
 343 00 0  
 344 00 0  
 345 00 0  
 346 00 0  
 347 00 0  
 348 00 0  
 349 00 0  
 350 00 0  
 351 00 0  
 352 00 0  
 353 00 0

## PROGRAMA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE SEPARADORES WEBRE.

## D.1 RESUMEN DEL PROGRAMA.

Este programa obtiene las dimensiones de un separador tipo Webre en función del flujo volumétrico de mezcla a separar.

Una vez obtenidas las dimensiones del equipo, calcula la calidad final del vapor. Proporciona los parámetros de Baker para determinar el patrón de flujo, requiriéndose para esto el uso de la carta de Baker mostrada en el Capítulo 4.

Dados:

$W_L$  = Gasto másico de líquido [kg/s]

$G_L$  = Gasto volumétrico de líquido [ $m^3/s$ ]

$W_V$  = Gasto másico de vapor [kg/s]

$G_V$  = Gasto volumétrico de vapor [ $m^3/s$ ]

$v_f$  = Volumen específico del líquido [ $m^3/kg$ ]

$v_g$  = Volumen específico del vapor [ $m^3/kg$ ]

$T_s$  = Temperatura de saturación correspondiente a la presión de separación [ $^{\circ}C$ ]

FALDON = Altura del faldón [m]

$\sigma_L$  = Tensión superficial [N/m]

Obtiene:

$D_T$  = Diámetro de entrada al equipo [m]

$D$  = Diámetro del separador [m]

$\alpha$  = Distancia entre el tubo de salida y la soldadura de la tapa [m]

$\beta$  = Distancia entre la entrada de mezcla y la salida de líquido separado [m]

$z$  = Distancia entre la entrada de mezcla y la salida de vapor [m]

$V_1$  = Velocidad en la entrada cuadrada [m/s]

$V$  = Velocidad del vapor en la tubería de entrada [m/s]

$n$  = Exponente del vórtice

$t_{res}$  = Tiempo de residencia del vapor en el equipo [s]

$k_c$  = Número adimensional que depende de las dimensiones del equipo

$c$  = Número adimensional en función del área de entrada al equipo

$B_x$  = Parámetro Baker "x"

$B_y$  = Parámetro Baker "y"

$d_p$  = Diámetro de gota [m]

$\psi$  = Número adimensional en función de  $d_p$ ,  $n$  y  $V$

$\eta_m$  = Eficiencia mecánica de separación

$V_{cent}$  = Velocidad de ascenso del vapor [m/s]

$\eta_A$  = Eficiencia por arrastre

$Ca$  = Calidad final del vapor separado

$\Delta P$  = Caída de presión a través del equipo [Pa]

PASO	PROCEDIMIENTO	INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	MEMORIAS
1	Introducir Programa				00
2	Introducir Propiedades				01 FALDON
	$v_f$	$v_f$	B'	$v_f$ ( m <sup>3</sup> /kg )	02 $W_L$
	$v_g$	$v_g$	R/S	$v_g$ ( m <sup>3</sup> /kg )	03 $Q_L$
	$\mu_L$	$\mu_L$	C'	$\mu_L$ ( kg/m s )	04 $W_v$
	$\mu_g$	$\mu_g$	R/S	$\mu_g$ ( kg/m s )	05 $Q_v$
	$T_s$	$T_s$	D'	$T_s$ ( °C )	06 $D_T$
	FALDON	FALDON	R/S	FALDON ( m )	07 D
	L	L.	R/S	L ( N/m )	08 $\alpha$
3	Introducir Gastos				09 z
	$W_L$	$W_L$	A	$W_L$ ( kg/s )	10 $V_1$
	$Q_L$	$Q_L$	R/S	$Q_L$ ( m <sup>3</sup> /s )	11 $T_s$
	$W_v$	$W_v$	B	$W_v$ ( kg/s )	12 n
	$Q_v$	$Q_v$	R/S	$D_{Ti}$ ( m )	13 $v_f$
4	Se ajusta el valor de $D_T$ a un valor comercial .	$D_T$	C		14 $v_g$
			R/S	D ( m )	15 $\mu_L$
			R/S	$\alpha$ ( m )	16 L
			R/S	$\beta$ ( m )	17 $dp$
			R/S	z ( m )	18 $\eta_m$
			R/S		19 $\eta_A$
			R/S		20 Ca
			R/S		21 c
			R/S		22 a
			R/S		23 B

PASO	PROCEDIMIENTO	INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	MEMORIAS
5	Calcular los parámetros de Baker			$V_1$ ( m/s )	24 e
			R/S	$V$ ( m/s )	25 V
			D	n	26 $\mu_v$
			R/S	$t_{res}$ ( s )	
			R/S	$k_c$	
			R/S	c	
			R/S	$B_x$	
			R/S	$B_y$	
6	Introducir las constantes de la ecuación del diámetro de gota	a	E'	a	
		B	R/S	B	
		e	R/S	e	
7	Cálculo de eficiencias y calidad		E	$\Delta p$ ( m )	

PASO	PROCEDIMIENTO	INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	MEMORIAS
8	Cálculo de la caída de presión		R/S R/S R/S R/S R/S A'	$\Psi$ $\eta_m$ $V_{cent}$ ( m/s ) $\eta_A$ Ca $\Delta P$ ( Pa )	



## D.2 EJEMPLO DE UTILIZACION.

Diseñar un separador tipo Webre para operar a 5.45 bar con un gasto de mezcla de 52.874 kg/s y una entalpía total de 812.4 kJ/kg.

Solución.

Los flujos serán:

$$W_L = 48.8767 \text{ kg/s}$$

$$Q_L = 0.0538 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$W_v = 3.9973 \text{ kg/s}$$

$$Q_v = 1.4334 \text{ m}^3/\text{s}$$

De las tablas de vapor, las propiedades termodinámicas a la presión de separación serán:

$$v_f = 0.0011 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g = 0.3586 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\mu_L = 1.736 \times 10^{-4} \text{ kg/m s}$$

$$\mu_g = 14.669 \times 10^{-6} \text{ kg/m s}$$

$$L = 0.0467 \text{ N/m}$$

$$\text{FALDON} = 0.04 \text{ m}$$

INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	COMENTARIO
	RST		RESET FLAGS
0.0011	B'	0.0011	$v_f$ ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )
0.3586	R/S	0.3586	$v_g$ ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )
$1.736 \times 10^{-4}$	C'	$1.736 \times 10^{-4}$	$\mu_L$ ( $\text{kg/m s}$ )
$14.669 \times 10^{-6}$	R/S	$14.669 \times 10^{-6}$	$\mu_g$ ( $\text{kg/m s}$ )
155.3	D'	155.3	$T_s$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
0.04	R/S	0.04	FALDON ( m )
0.0467	R/S	0.0467	L ( $\text{N/m}$ )
48.8767	A	48.8767	$W_L$ ( $\text{kg/s}$ )
0.0538	R/S	0.0538	$Q_L$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	COMENTARIO
3.9973	B	3.9973	$W_v$ ( kg/s )
1.4334	R/S	0.228319566	$Q_L$ $D_{Ti}$ Se ajusta $D_T$ a un valor comercial.
0.254	C	0.8382	$D_T$ D
	R/S	- 0.0381	$\alpha$ ( m )
	R/S	0.889	$\beta$ ( m )
	R/S	1.397	z ( m )
	R/S	22.21774444	$V_1$ ( m/s )
	R/S	28.28851081	V ( m/s )
	D	0.6111247573	$\eta$
	R/S	0.503145084	$t_{res}$ ( s )
	R/S	1.22466601	$k_c$
	R/S	106.6929028	c
	R/S	16.50261102	Bx
	R/S	39,971.66172	By
0.8069	E'	0.8069	a
31.9298	R/S	31.9298	B
- 0.2188	R/S	- 0.2188	e
	E	$116.30457 \times 10^{-6}$	$d_p$ ( m )
	R/S	1.988883336	$\psi$
	R/S	0.9999737203	$\eta_m$
	R/S	2.860314541	$V_{cent}$ ( m/s )
	R/S	0.9999998235	$\eta_A$
	R/S	0.9996766127	Ca
	A'	0.1101234061	$\Delta P$ ( Pa )

000 76 LBL  
 001 11 A  
 002 42 STD  
 003 02 02  
 004 91 R/S  
 005 42 STD  
 006 03 03  
 007 91 R/S  
 008 76 LBL  
 009 12 B  
 010 42 STD  
 011 04 04  
 012 91 R/S  
 013 42 STD  
 014 05 05  
 015 65 x  
 016 04 4  
 017 55 ÷  
 018 89 ÷  
 019 55 ÷  
 020 03 3  
 021 05 5  
 022 95 =  
 023 34 FX  
 024 91 R/S  
 025 76 LBL  
 026 13 C  
 027 42 STD  
 028 06 06  
 029 65 x  
 030 03 3  
 031 93 .  
 032 03 3  
 033 95 =  
 034 42 STD  
 035 07 07  
 036 91 R/S  
 037 43 RCL  
 038 06 06  
 039 65 x  
 040 93 .  
 041 01 1  
 042 05 5  
 043 94 +/-  
 044 95 =  
 045 42 STD  
 046 08 08  
 047 91 R/S  
 048 43 RCL  
 049 06 06  
 050 65 x  
 051 03 3  
 052 93 .  
 053 05 5  
 054 95 =  
 055 91 R/S  
 056 43 RCL  
 057 06 06  
 058 65 x  
 059 05 5

233

060 93 .  
 061 05 5  
 062 95 =  
 063 42 STD  
 064 09 09  
 065 91 R/S  
 066 43 RCL  
 067 05 05  
 068 55 ÷  
 069 43 RCL  
 070 06 06  
 071 33 X<sup>2</sup>  
 072 95 =  
 073 42 STD  
 074 10 10  
 075 91 R/S  
 076 76 LBL  
 077 17 B'  
 078 42 STD  
 079 13 13  
 080 91 R/S  
 081 42 STD  
 082 14 14  
 083 91 R/S  
 084 76 LBL  
 085 19 C'  
 086 42 STD  
 087 15 15  
 088 91 R/S  
 089 42 STD  
 090 26 26  
 091 91 R/S  
 092 76 LBL  
 093 19 D'  
 094 42 STD  
 095 11 11  
 096 91 R/S  
 097 42 STD  
 098 00 00  
 099 91 R/S  
 100 42 STD  
 101 16 16  
 102 91 R/S  
 103 76 LBL  
 104 14 D  
 105 43 RCL  
 106 05 05  
 107 65 x  
 108 04 4  
 109 55 ÷  
 110 89 ÷  
 111 55 ÷  
 112 43 RCL  
 113 06 06  
 114 33 X<sup>2</sup>  
 115 95 =  
 116 42 STD  
 117 25 25  
 118 53 (  
 119 53 (  
 120 43 RCL  
 121 11 11  
 122 85 +  
 123 02 2  
 124 07 7  
 125 03 3  
 126 93 .  
 127 02 2  
 128 54 )  
 129 55 ÷  
 130 02 2  
 131 09 9  
 132 04 4  
 133 93 .  
 134 03 3  
 135 54 )  
 136 45 YX  
 137 93 .  
 138 03 3  
 139 95 =  
 140 65 x  
 141 53 (  
 142 01 1  
 143 75 -  
 144 53 (  
 145 93 .  
 146 06 6  
 147 06 6  
 148 08 8  
 149 09 9  
 150 65 x  
 151 43 RCL  
 152 07 07  
 153 45 YX  
 154 93 .  
 155 01 1  
 156 04 4  
 157 54 )  
 158 54 )  
 159 95 =  
 160 94 +/-  
 161 95 +  
 162 01 1  
 163 95 =  
 164 42 STD  
 165 12 12  
 166 91 R/S  
 167 53 (  
 168 43 RCL  
 169 08 08  
 170 85 +  
 171 43 RCL  
 172 00 00  
 173 54 )  
 174 65 x  
 175 93 .  
 176 09 9  
 177 00 0  
 178 08 8  
 179 01 1

180	07	7	234	240	65	X	300	53	(
181	02	2	241	89	π	301	43	RCL	
182	06	6	242	65	X	302	02	02	
183	03	3	243	43	RCL	303	55	+	
184	75	-	244	09	09	304	43	RCL	
185	53	(	245	55	+	305	04	04	
186	43	RCL	246	04	4	306	54	)	
187	07	07	247	54	)	307	65	X	
188	65	X	248	95	=	308	02	2	
189	01	1	249	55	+	309	93	.	
190	05	5	250	43	RCL	310	01	1	
191	93	.	251	05	05	311	00	0	
192	05	5	252	22	INV	312	05	5	
193	01	1	253	52	EE	313	08	8	
194	08	8	254	95	=	314	03	3	
195	08	8	255	91	R/S	315	04	4	
196	02	2	256	65	X	316	03	3	
197	05	5	257	43	RCL	317	02	2	
198	52	EE	258	05	05	318	95	=	
199	03	3	259	55	+	319	22	INV	
200	94	+/-	260	43	RCL	320	52	EE	
201	54	)	261	07	07	321	91	R/S	
202	65	X	262	45	YX	322	53	(	
203	89	π	263	03	3	323	43	RCL	
204	65	X	264	95	=	324	04	04	
205	43	RCL	265	91	R/S	325	65	X	
206	07	07	266	65	X	326	04	4	
207	33	X <sup>2</sup>	267	03	3	327	55	+	
208	55	+	268	93	.	328	89	π	
209	04	4	269	03	3	329	55	+	
210	95	=	270	33	X <sup>2</sup>	330	43	RCL	
211	85	+	271	65	X	331	06	06	
212	53	(	272	08	8	332	33	X <sup>2</sup>	
213	53	(	273	95	=	333	54	)	
214	43	RCL	274	42	STD	334	65	X	
215	07	07	275	21	21	335	53	(	
216	45	YX	276	91	R/S	336	43	RCL	
217	03	3	277	53	(	337	13	13	
218	54	)	278	43	RCL	338	65	X	
219	65	X	279	13	13	339	43	RCL	
220	93	.	280	22	INV	340	14	1 <sup>4</sup>	
221	00	0	281	45	YX	341	54	)	
222	08	8	282	06	6	342	34	FX	
223	01	1	283	55	+	343	65	X	
224	54	)	284	43	RCL	344	02	2	
225	95	=	285	14	14	345	05	5	
226	55	+	286	34	FX	346	05	5	
227	02	2	287	54	)	347	01	1	
228	95	=	288	65	X	348	01	1	
229	85	+	289	53	(	349	93	.	
230	53	(	290	43	RCL	350	03	3	
231	53	(	291	15	15	351	01	1	
232	43	RCL	292	22	INV	352	01	1	
233	07	07	293	45	YX	353	00	0	
234	33	X <sup>2</sup>	294	03	3	354	02	2	
235	75	-	295	55	+	355	95	=	
236	43	RCL	296	43	RCL	356	31	R/S	
237	06	06	297	16	16	357	76	LBL	
238	33	X <sup>2</sup>	298	54	)	358	10	E'	
239	54	)	299	65	X	359	42	STD	

360	22	22	420	13	13	480	54	)
361	91	R/S	421	65	x	481	55	+
362	42	STD	422	01	1	482	53	(
363	23	23	423	00	0	483	01	1
364	91	R/S	424	00	0	484	08	8
365	42	STD	425	55	+	485	55	x
366	24	24	426	43	RCL	486	43	RCL
367	91	R/S	427	16	16	487	26	26
368	76	LBL	428	54	)	488	65	x
369	15	E	429	45	YX	489	43	RCL
370	53	(	430	93	.	490	07	07
371	53	(	431	02	2	491	55	x
372	43	RCL	432	02	2	492	43	RCL
373	16	16	433	05	5	493	13	13
374	65	x	434	65	x	494	54	)
375	43	RCL	435	43	RCL	495	35	=
376	13	13	436	25	25	496	91	R/S
377	65	x	437	45	YX	497	65	x
378	01	1	438	43	RCL	498	43	RCL
379	52	EE	439	24	24	499	21	21
380	06	6	440	65	x	500	95	=
381	54	)	441	01	1	501	22	INV
382	34	FX	442	03	3	502	45	YX
383	65	x	443	05	5	503	53	(
384	06	6	444	07	7	504	53	(
385	06	6	445	93	.	505	43	RCL
386	93	.	446	03	3	506	12	12
387	02	2	447	04	4	507	85	+
388	08	8	448	06	6	508	01	1
389	09	9	449	65	x	509	54	)
390	03	e	450	43	RCL	510	55	x
391	55	+	451	23	23	511	02	2
392	43	RCL	452	54	)	512	54	)
393	25	25	453	95	=	513	95	=
394	45	YX	454	65	x	514	65	x
395	43	RCL	455	01	1	515	02	2
396	22	22	456	52	EE	516	94	+/-
397	54	)	457	06	6	517	95	=
398	85	+	458	94	+/-	518	22	INV
399	53	(	459	95	=	519	23	LNx
400	53	(	460	42	STD	520	94	+/-
401	43	RCL	461	17	17	521	85	+
402	03	03	462	57	ENG	522	01	1
403	55	+	463	91	R/S	523	95	=
404	43	RCL	464	22	INV	524	42	STD
405	05	05	465	57	ENG	525	13	18
406	54	)	466	53	(	526	22	INV
407	45	YX	467	43	RCL	527	52	EE
408	93	.	468	17	17	528	91	R/S
409	05	5	469	33	X <sup>2</sup>	529	53	(
410	05	5	470	65	x	530	43	RCL
411	00	0	471	43	RCL	531	07	07
412	07	7	472	10	10	532	33	X <sup>2</sup>
413	65	x	473	65	x	533	75	-
414	53	(	474	53	(	534	43	RCL
415	43	RCL	475	43	RCL	535	05	06
416	15	15	476	12	12	536	33	X <sup>2</sup>
417	33	X <sup>2</sup>	477	85	+	537	34	)
418	65	x	478	01	1	538	65	x
419	43	RCL	479	54	)	539	39	#

540	95	=	600	43	RCL
541	35	1/X	601	04	04
542	65	x	602	55	÷
543	04	4	603	43	RCL
544	65	x	604	02	02
545	43	RCL	605	95	=
546	05	05	606	42	STD
547	95	=	607	20	20
548	91	R/S	608	91	R/S
549	45	YX	609	76	LBL
550	01	1	610	16	A'
551	03	3	611	08	8
552	93	.	612	65	x
553	09	9	613	43	RCL
554	02	2	614	10	10
555	04	4	615	33	X <sup>2</sup>
556	01	1	616	55	÷
557	95	=	617	43	RCL
558	65	x	618	14	14
559	03	3	619	95	=
560	93	.	620	55	÷
561	03	3	621	05	5
562	08	8	622	22	INV
563	03	3	623	28	LOG
564	09	9	624	95	=
565	09	9	625	91	R/S
566	06	6	626	00	0
567	94	+/-	627	00	0
568	52	EE	628	00	0
569	01	1	629	00	0
570	04	4	630	00	0
571	94	+/-	631	00	0
572	95	=	632	00	0
573	22	INV	633	00	0
574	23	LOG	634	00	0
575	42	STD	635	00	0
576	19	19	636	00	0
577	22	INV	637	00	0
578	52	EE	638	00	0
579	91	R/S	639	00	0
580	01	1	640	00	0
581	75	-	641	00	0
582	53	(	642	00	0
583	43	RCL	643	00	0
584	13	18	644	00	0
585	65	x	645	00	0
586	43	RCL	646	00	0
587	19	19	647	00	0
588	54	)	648	00	0
589	85	+	649	00	0
590	53	(	650	00	0
591	43	RCL	651	00	0
592	04	04	652	00	0
593	55	÷	653	00	0
594	43	RCL			
595	02	02			
596	54	)			
597	95	=			
598	35	1/X			
599	65	x			

## PROGRAMA PARA CALCULAR EL VALOR PRESENTE DE UNA ALTERNATIVA DE INVERSIÓN.

### E.1 RESUMEN DEL PROGRAMA.

Este programa calcula el valor presente de los costos de mantenimiento y operación de una alternativa de inversión a lo largo del horizonte de planificación.

Contiene procedimientos para calcular también el valor presente de los costos de reinversión si llegan a presentarse durante la vida del proyecto.

Requiere del uso de la impresora PC-100A para mantener registro impreso del flujo de efectivo. Debido a esto se deben de introducir los códigos de impresión de letreros en las memorias 15 a 27, antes de utilizar este programa.

## E.2 METODO EMPLEADO.

El factor de descuento se calcula de la siguiente manera:

$$F.D. = \left( \frac{1}{1+i} \right)^n$$

Donde:

F.D. = Factor de descuento

i = Tasa de descuento

n = Número de periodos considerados

Por lo tanto, al final de cada periodo ( j ) del horizonte de planificación se tendrán unos gastos de operación y de mantenimiento, que tendrán como valor presente:

$$(V.P.)_j = \left( \frac{1}{1+i} \right)^j (\text{Costos Mantenimiento} + \text{Costos Operación})$$

En caso de incurrir en gastos de reinversión en el periodo considerado, el valor presente de los costos de ese periodo serán:

$$(V.P.)_j = \left( \frac{1}{1+i} \right)^j \text{Costo de Reinversión}$$

El valor presente total de la alternativa de inversión será la suma de los valores presentes de los costos ocurridos en cada uno de los periodos que comprendan la vida del proyecto, más el costo inicial ocurrido en el periodo cero.

$$V.P. \text{ TOTAL} = \text{Costo inicial} + \sum_{j=1}^n (V.P.)_j$$



PASO	PROCEDIMIENTO	INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	MEMORIAS
1	Introducir Programa				00
2	Introducir Valores Iniciales				01 i
	i ( decimal )	i	A'		02 n
	n ( períodos )	n	B'		03 C. IN
	Costo Inicial	C.IN	C'	0. PERI	04 C. MA
	Costo Mantenimiento	C.MA	A	Costo Inicial C. IN	05 C. OP
	Costo Operación	C.OP	B		06 V.P. TOTAL
3	Calcular valor presente del primer período		CLR		07 C. RE
			C	Número de Período PERI	08 1/1 + i
			R/S	Factor de Descuento F.D	09 j
				Costo Mantenimiento C.MA	10 F.D.
				Costo Operación C.OP	11 V.P. j
				Valor Presente V.P	12
4	Calcular valor presente de cualquier período, considerando constantes C.MA y C.OP		R/S	Número del período considerado PERI	13
				Factor de Descuento F.D	14
				Costo Mantenimiento C.MA	15 3317352432
				Costo Operación C.OP	16 15402431
				Valor Presente V.P	17 214016
5	Si en el período considerado hay cambios de C.MA, C.OP o existe una reinversión				18 15403013
					19 15403233
					20 424033
					21 24313717
					22 4213273235
					23 33351736

PASO	PROCEDIMIENTO	INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	MEMORIAS
6	Al terminar de considerar el total de periodos	C.MA o C.OP o C.RE	A o B o D' CLR D	PERI C.RE F.D C.MA C.OP V.P  VALOR PRESENTE TOTAL valor presente total interés INTE número periodos N.PE	24 1731371700 25 3732371327 26 31403317 27 1540351

## E.3 EJEMPLO DE UTILIZACION.

Sea el siguiente flujo de efectivo.

Costo inicial = 1000

Costo mantenimiento = 30

Costo operación = 20

Costo de reinversión en el año 5 = 500

$i = 25\%$

$n = 10$

INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	COMENTARIO
0.25	A'		i
10	B'		n
1000	C'	0. PERI 1000 C.IN	
30	A		C.MA
20	B		C.OP
	CLR		
	C	1. PERI	
	R/S		
		0.8 F.D	
		30 C.MA	
		20 C.OP	
		40 V.P	
		2. PERI	Ya que del período
	R/S	·	2 al 4 no hay cam-
		·	bios, sólo se
		3. PERI	corime R/S
	R/S	·	
		·	
		4. PERI	

INTRODUCIR	PRESIONAR	DISPLAY	COMENTARIO
500	D' D	5. PERI  500 C.RE 0.32768 F.D 30 C.MA 20 C.OP 180.224 V.P	Se introduce costo de reinversión
	R/S	6. PERI .	Ya que del período 6 al 10 no hay
	R/S	7. PERI .	cambios, sólo se oprime R/S
	R/S	8. PERI .	
	R/S	9. PERI .	
	R/S	10. PERI	
		VALOR PRESENTE TOTAL 1 342.365164	Imprime el resultado total de la evaluación a valor
		25. INTE	presente así como
		10. N.PE	el interés y el número de períodos considerados.

000	76	LBL	060	13	C	120	95	=
001	15	A'	061	69	DP	121	44	SUM
002	42	STD	062	29	29	122	06	06
003	01	01	063	43	RCL	123	69	DP
004	25	+	064	15	15	124	06	06
005	01	1	065	69	DP	125	00	0
006	95	=	066	04	04	126	42	STD
007	35	1/X	067	43	RCL	127	11	11
008	42	STD	068	09	09	128	98	ADV
009	08	08	069	69	DP	129	97	DSZ
010	43	RCL	070	06	06	130	02	02
011	01	01	071	91	R/S	131	13	C
012	91	R/S	072	76	LBL	132	98	ADV
013	76	LBL	073	14	D	133	98	ADV
014	17	B'	074	87	IFF	134	43	RCL
015	42	STD	075	01	01	135	22	22
016	02	02	076	95	=	136	69	DP
017	91	R/S	077	43	RCL	137	01	01
018	76	LBL	078	17	17	138	43	RCL
019	18	C'	079	69	DP	139	23	23
020	42	STD	080	04	04	140	69	DP
021	03	03	081	43	RCL	141	02	02
022	43	RCL	082	08	08	142	43	RCL
023	15	15	083	45	YX	143	24	24
024	69	DP	084	43	RCL	144	69	DP
025	04	04	085	09	09	145	03	03
026	43	RCL	086	95	=	146	43	RCL
027	09	09	087	42	STD	147	25	25
028	69	DP	088	10	10	148	69	DP
029	06	06	089	69	DP	149	04	04
030	43	RCL	090	06	06	150	69	DP
031	16	16	091	43	RCL	151	05	05
032	69	DP	092	18	18	152	98	ADV
033	04	04	093	69	DP	153	43	RCL
034	43	RCL	094	04	04	154	06	06
035	03	03	095	43	RCL	155	99	PRT
036	69	DP	096	04	04	156	69	DP
037	06	06	097	44	SUM	157	00	00
038	98	ADV	098	11	11	158	98	ADV
039	42	STD	099	69	DP	159	43	RCL
040	06	06	100	06	06	160	21	21
041	91	R/S	101	43	RCL	161	69	DP
042	76	LBL	102	19	19	162	04	04
043	19	D'	103	69	DP	163	43	RCL
044	42	STD	104	04	04	164	01	01
045	07	07	105	43	RCL	165	55	x
046	26	STF	106	05	05	166	01	1
047	01	01	107	44	SUM	167	00	0
048	91	R/S	108	11	11	168	00	0
049	76	LBL	109	69	DP	169	95	=
050	11	A	110	06	06	170	69	DP
051	42	STD	111	43	RCL	171	06	06
052	04	04	112	20	20	172	98	ADV
053	91	R/S	113	69	DP	173	43	RCL
054	76	LBL	114	04	04	174	26	26
055	12	B	115	43	RCL	175	69	DP
056	42	STD	116	10	10	176	04	04
057	05	05	117	65	x	177	43	RCL
058	91	R/S	118	43	RCL	178	09	09
059	76	LBL	119	11	11	179	69	DP

180	06	06
181	93	ADV
182	93	ADV
183	25	CLR
184	42	STD
185	06	06
186	42	STD
187	09	09
188	91	R/S
189	76	LBL
190	95	=
191	43	RCL
192	27	27
193	69	OP
194	04	04
195	43	RCL
196	07	07
197	69	OP
198	06	06
199	42	STD
200	11	11
201	32	INV
202	36	STF
203	01	01
204	14	D
205	00	0
206	00	0
207	00	0
208	00	0
209	00	0
210	00	0
211	00	0

## BIBLIOGRAFIA.

1. Aguilar, R.M., Criterios de Diseño de Plantas Termoeléctricas, México: Limusa, 1981.
2. Alonso, E.H., "Situación Actual y Programas Futuros en el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica Para la Generación de Electricidad en la República Mexicana", Boletín IIE, V. 6, n. 3, marzo 1982, pp. 112-115.
3. Angulo, R.C., Diseño de un Separador Híbrido Para Agua Separada de Pozos Geotérmicos en Cerro Prieto, Tesis licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, 1978.
4. Armstead, C.H., Geothermal Energy, London: E. & F.N. Spon Ltd, 1978.
5. Central Electricity Generating Board, "Turbine and Auxiliary Equipment", Modern Power Station Practice, V. 3, 1971.
6. Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Investigaciones Eléctricas, Curso Intensivo Sobre Geotermia, Los Azufres, Mexico, mayo 1978.
7. Considine, D.M., Energy Technology Handbook, New York: McGraw-Hill, 1977.
8. Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, CFE, Central Geotermoeléctrica de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California Norte, México, agosto 1982.
9. Crane, Co., "Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe", New York 1981.
10. Duckler, W. y Cleveland, R., "Pressure Drop and Hold-up in Two-Phase Flow, Part B: An Approach Through Similarity Analysis", AIChE Journal 10 1, pp. 38-51.

11. Díaz, C.R., Programa Para el Cálculo de Balances en Plantas Geotermoeléctricas con Evaporación Instantánea, Tesis licenciatura, Instituto Tecnológico Regional de la Laguna, 1980.
12. EPRI, Proceedings of The 3th. Annual Geothermal Conference and Workshop, 1979.
13. EPRI, Proceedings of The 6th. Annual Geothermal Conference and Workshop, 1982.
14. EPRI, Seminario EPRI/IEE Sobre Programas de Geotermia, 1982.
15. Enriquez, H.G., Elementos de Centrales Eléctricas, Tomo I, México: Limusa, 1982.
16. Franco, R.J., Utilización de la Energía Geotérmica Para la Creación de Espacios de Clima Controlado en Cerro Prieto, B.C., Tesis licenciatura, Instituto Tecnológico Regional de Tijuana, B.C., 1980.
17. General Electric Co., Compendium of GE Medium Steam Turbine Generator for Geothermal Applications.
18. Gutiérrez, D.A. y Cristalinas, N.V., Programa de Cálculo de Aislamiento Térmico, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1981 ( Reporte EI-N-110/3667 ).
19. Grinnell, Co. Inc., Piping Design and Engineering, 1963.
20. Hernández, G.E., "Ciclos Térmicos en Plantas Geotermoeléctricas Para Generar Energía Eléctrica", Boletín IIE, V. 1, n. 3, julio 1977, pp. 7-9.
21. Hugmark, "Hold-up in Gas-Liquid Flow", Chemical Engineering Progress, V. 58, n. 4, 1962.



22. Keenan, J.H., et al, Steam Tables, John Wiley & Sons, 1978.
23. Kestin, J., et al, Sourcebook on The Production of Electricity From Geothermal Energy, Washington: U.S. Department of Energy, march 1980.
24. Kern, D.Q., Procesos de Transferencia de Calor, México: CECSA, 1979.
25. Lazalde, C.H. y Buendía, D.E., Manual de Diseño de Equipo Geotérmico de Superficie, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1982 ( Reporte 3248-II-F-38 ).
26. Ludwig, E.E., Applied Process Design For Chemical and Petrochemical Plants, Gulf Publishing Co., V. 1, 1964, p. 26.
27. Mercado, S., "Salmuera de Desecho de la Planta Geotérmica Cerro Prieto, Problemas y Posibles Soluciones", Boletín IIE, abril 1977, pp. 12-14.
28. Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Geothermal Power Generation by Mitsubishi.
29. Márquez, M.R., Estudio Teórico del Comportamiento de un Flasheador Tipo Horizontal, Tesis licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California 1978.
30. McAdams, W.H., Transmisión de Calor, McGraw-Hill, 1954.
31. Morse, F.T., Centrales Eléctricas, México: CECSA, 1961.
32. OLADE-CFE, III Seminario Sobre Desarrollo y Explotación Geotérmica, 1980.
33. Perry, H.R. y Cecil, H.Ch., Manual del Ingeniero Químico, México: McGraw-Hill, 1973.
34. Pitts, D., Transferencia de Calor, México: McGraw-Hill, 1979.

35. Reza, Ch.J., Otimización del Aprovechamiento del Fluido Geotérmico, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1978 ( Reporte II-F-24 ).
36. Reza, Ch.J., "Ciclos Alternativos Para la Utilización de la Energía Geotérmica", Boletín IIE, V. 3, n. 4, abril 1979, pp. 3-15.
37. Rufz Esparza, G.R. y Tello, C.A., Ciclos Termodinámicos Para Aprovechamiento de Fluido Geotérmico, Tesis licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, 1979.
38. Sánchez, S.F., Estudio Bibliográfico de Flujo en Dos Fases, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1981 ( Reporte 250-II-F-42 ).
39. Streeter, V.L., Mecánica de los Fluidos, México: McGraw-Hill, 1975.
40. Swift, D.Ch., Plantas de Vapor, México: CECSA, 1979.
41. Texas Instruments Inc., TI 58/59 Specialty Pakettes, Fluid Dynamics.
42. United Nations, Proceedings The United Nations Conference on New Sources of Energy, Roma, 1961.
  - Bangma, P., "The Development and Performance of a Steam-Water Separator for Use on Geothermal Bores", pp. 60-77.
  - Averiev, V.V., "The Technique of Testing Geothermal Wells", pp.54-59.
  - White, D.E., "Preliminary Evaluation of Geothermal Areas by Geochemistry, Geology, and Shallow Drilling", pp. 402-408.
43. United Nations, Proceedings of The United Nations Symposium on The Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, 1970.
  - James, R., "Flow of Steam-Water Mixtures Through a 12-Inch Diameter Pipeline: Test Results", pp. 1581-1587.

- Takahashi, Y., et al., "An Experiment on Pipelines Transportation of Steam-Water Mixtures at Otake Geothermal Field", pp. 882-891.
44. United Nations, Proceedings of The Second United Nations Symposium on The Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, 1975.
- Axtmann, C.R., "Chemical Aspects of The Environmental Impact of Geothermal Power", pp. 1323-1328.
  - James, R., "Control Orifices Replace Steam Traps on Overland Transmission Pipeline", pp. 1699-1702.
  - James, R., "Rapid Estimation of Electric Power Potential of Discharging Geothermal Wells", pp. 1685-1688.
  - James, R. McNitt, "Summary of United Nations Geothermal Exploration Experience, 1965 to 1975", pp. 1127-1134.
  - Maurer, C.W., "Geothermal Drilling Technology", pp. 1509-1522.
  - Mercado, S., "Proyecto Geotermoeléctrico de Cerro Prieto: Contaminación y Protección Básica", pp. 1385-1393.
45. White, F.M., Fluid Mechanics, McGraw-Hill, 1979.