



Universidad Nacional Autónoma de México

**Escuela Nacional de Estudios Profesionales
"ARAGON"**

"Estudio de factibilidad para la conducción de
Fluido Geotérmico con dos fases, por medio
de un sistema de colectores"

Sist. 40412

TESIS PROFESIONAL

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

GUILLERMINA AVENDAÑO SOTO

Asesor: DR. FLORENCIO SANCHEZ SILVA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología,
por la beca-tesis otorgada durante 6 meses.

Al Instituto de Investigaciones Eléctricas
por la ayuda profesional y económica brindada
para el desarrollo del presente trabajo.

Al departamento mecánico de la división de
estudios de Ingeniería del IIE por el
compañerismo y ayuda brindada.

A la Universidad Nacional Autónoma de México
y a la ENEP-Aragón por la oportunidad otorgada
para realizar mis estudios profesionales.

A los profesores que contribuyeron en mi
superación académica.

A mis amigos y compañeros universitarios que
tuvieron un papel trascendente en el desarrollo
de mi carrera profesional.

Agradecimientos

Al Dr. Florencio Sánchez Silva, director de tesis, un agradecimiento muy especial por la asesoría e información otorgada, así como por el interés mostrado en el desarrollo del presente trabajo.

Al M. en C. Mario Ramírez de Santiago por su valiosa ayuda, crítica y comentarios, así como por el compañerismo y estímulos de superación brindados.

Al Ing. Ranulfo Gutiérrez Ramírez por la información y asesorías proporcionadas.

Al Ing. Erasmo Martínez Barrera por la confianza y estímulos brindados.

Dedicatorias

A quien merece todo mi amor y respeto porque
le debo el acto más trascendental del ser
humano: la vida.

A quien me ha dado la oportunidad de ser lo
que soy o lo que puedo llegar a ser, y por
quien mis logros tienen doble validez.

Mi madre

A mis Hermanos

Enrique:

Por haber superado obstáculos más
grandes que los míos y por que sabes
valorar las oportunidades de la vida
a través de los errores.

Tomás:

Por que siempre confiaste en mis actos
y decisiones. Por que tu nobleza es muy
grande y lo has demostrado conservando
lo más valioso que tienes: tu familia.

Arturo:

Por haber demostrado que las obras
grandes de la vida dependen de la
voluntad y no de la edad. Y por el
carifio que siempre nos ha unido.

Lilia:

Por ser mejor que yo y querer
demostrar lo contrario.
Por que has sabido valorar la armonia
que existe entre lo cóncavo y convexo.

Janeth:

Por que siendo la más pequeña
tu carácter y voluntad son enormes.
Por que ante ti tienes un futuro
brillante por el cual debes esforzarte.

INDICE

INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I: GENERALIDADES SOBRE GEOTERMIA.....	5
I.1 Campo Geotérmico de Cerro Prieto.....	8
I.1.1 Geología.....	8
I.1.2 Características de Operación.....	10
I.1.2.1 Descripción del arreglo.....	10
I.1.2.2 Equipo de superficie.....	13
I.1.3 Capacidad instalada.....	17
CAPITULO II: ANTECEDENTES DE LA CONDUCCION DEL FLUIDO GEOTERMICO	19
II.1 Ciclos Térmicos.....	22
II.2 Conducción de vapor.....	25
II.3 Conducción de agua separada.....	27
II.3.1 Patrones de flujo.....	29
II.3.2 Flujo crítico.....	35
II.3.3 Incrustaciones.....	38
CAPITULO III: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	42
III.1 Alternativas a analizar.....	47
III.2 Enfoque del problema.....	51
III.2.1 Diagrama de Ishikawa.....	51
III.2.2 Diagrama de Pareto.....	53
III.3 Bases de comparación.....	56
III.3.1 Problemas Técnicos.....	56
III.3.1.1 Arreglo del sistema.....	56
III.3.1.2 Características de los pozos.....	58
III.3.1.3 Sistema de control.....	60
III.3.2 Material y equipo.....	61
III.3.3 Obra civil y mantenimiento.....	61
III.3.4 Evaluación económica.....	62

CAPITULO IV: ANALISIS DE ALTERNATIVAS.....	63
IV.1 Criterios para el análisis de Colectores.....	64
IV.1.1 Criterios para la selección del arreglo.....	65
IV.1.2 Alternativas A y B. Colectores.....	66
IV.1.3 Generalidades del análisis termodinámico de Colectores.....	73
IV.1.3.1 Dimensionamiento de líneas conductoras de vapor y separadores.....	73
IV.1.3.2 Equipos.....	78
IV.1.3.3 Dimensionamiento de líneas conductoras de mezcla.....	80
IV.1.3.4 Pérdidas de presión de flujo bifásico.....	82
IV.1.3.5 Análisis de confluencias.....	84
IV.1.4 Incrustaciones.....	88
IV.1.5 Sistema de control.....	91
IV.1.5.1 Control en los pozos.....	91
IV.1.5.2 Control en los colectores.....	93
IV.1.5.3 Control en los separadores.....	99
IV.1.5.4 Control en las líneas de vapor.....	100
IV.2 Alternativa C. Líneas independientes.....	104
IV.2.1 Descripción.....	104
IV.2.2 Generalidades sobre el análisis termodinámico.....	107
IV.2.2.1 Dimensionamiento de líneas de vapor.....	107
IV.2.2.2 Agua separada.....	108
IV.2.2.3 Conducción de agua remanente.....	110
IV.2.3 Incrustaciones.....	111
IV.2.4 Mantenimiento.....	112
IV.3 Evaluación económica.....	113
 CAPITULO V: RESULTADOS.....	 114
V.1 Resultados Técnicos.....	114
V.1.1 Condiciones de Operación.....	114
V.1.2 Dimensionamiento de tuberías.....	118
V.2 Resultados económicos.....	131
 CAPITULO VI: COMPARACION.....	 134
 CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	 141

ANEXOS

- ANEXO 1: Características de los pozos.
- ANEXO 2: Líneas conductoras de vapor y separadores.
- ANEXO 3: Dimensionamiento de líneas conductoras de vapor y separadores.
- ANEXO 4: Generalidades sobre el dimensionamiento de líneas conductoras de mezcla bifásica.
- ANEXO 5: Pérdidas de presión en tuberías horizontales. Método de Dukler II.
- ANEXO 6: Método homogéneo.
- ANEXO 7: Coeficientes de fricción K.
- ANEXO 8: Incrustaciones.
- ANEXO 9: Parámetros económicos.
- ANEXO 10: Inversión para la conducción de mezcla y agua separada.
- ANEXO 11: Inversión para líneas conductoras de vapor.
- ANEXO 12: Costo de instalaciones superficiales.

LETRAS GRIEGAS

α	Angulo	[Grados]
β	Parámetro de Dukler	[-]
δ	Factor de Hughmark	[-]
Δ	Incremento	[-]
ϵ	Rugosidad	[mm]
κ	Parámetro de Bankoff	[-]
λ	Fracción volumétrica superficial	[-]
μ	Viscosidad dinámica	[kg/m-s]
ν	Viscosidad cinemática	[m ² /s]
π	Númeri Pi	[-]
ρ	Densidad	[kg/m ³]
τ	Tensor de esfuerzos cortantes	[N/m ²]

SIMBOLOGIA

A	Area de la sección transversal	[m ²]
D	Diámetro	[m]
F	Fuerza	[N]
G	Densidad de flujo másico	[kg/m ² -s]
g	Aceleración de la gravedad	[m/s ²]
h	Entalpia	[kJ/kg]
K	Coefficiente de fricción	[-]
L	Longitud	[m]
P	Presión	[kPa]
Q	Flujo volumétrico	[m ³ /s]
R	Fracción volumétrica	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]
T	Temperatura	[C]
V	Velocidad	[m/s]
Vs	Velocidad superficial	[m/s]
v	Volúmen específico	[m ³ /kg]
W	Flujo másico	[kg/s]
X	Calidad	[-]

SUBINDICES

AS	Agua separada
ET	Entrada a la turbina
f	Fluido
G	Gas
H	Homogéneo
L	Líquido
M	Mezcla
N	Normal
NS	Sin deslizamiento (homogéneo)
o	Crítico
rec	Recomendada
SA	Separador de alta presión
SB	Separador de baja presión
T	Total
TP	Dos fases
V	Vapor
Z	Componente de fuerza externa por unidad de masa

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza de manera básica la conducción del fluido geotérmico, la relevancia del fenómeno se debe a la presencia de flujo en dos fases en las líneas conductoras y por consiguiente a los problemas inherentes al mismo.

El análisis se inicia con el planteamiento de arreglos que satisfagan las condiciones de la central geotérmica en estudio, que para éste caso es Cerro Prieto II, las cuales se definen por medio de un análisis de solución creativa, planteando diagramas de Pareto e Ishikawa.

El trabajo se caracteriza por analizar la conducción del fluido geotérmico utilizando arreglos con confluencias de tuberías llamados colectores, los cuales al final se comparan con la conducción por medio de líneas independientes. En cada alternativa se plantean problemas de importancia trascendente, como son: incrustaciones en las líneas conductoras de mezcla bifásica, mantenimiento de los equipos, sistemas de control en los arreglos, facilidad de implementación de los mismos, pérdidas de presión; entre los más importantes. En el análisis se incluye el comportamiento termodinámico del fluido bifásico, utilizándose el método del modelo homogéneo, así como considerando procesos reversibles e isentrópicos. En los colectores se determinan las pérdidas de presión que se presentan a lo largo de las tuberías y en los puntos de confluencia de las mismas, el análisis se efectúa con ayuda de programas de cómputo. Posteriormente, se realiza una estimación económica en base al criterio de valor presente y considerando la paridad del dólar. Concluido el análisis se selecciona la alternativa más adecuada.

En base al análisis de resultados se observa que es factible la utilización de colectores en Centrales Geotérmicas para la conducción de fluido bifásico, porque se presenta menor costo de inversión, así como un control de incrustaciones en equipos y líneas conductoras, además de la presencia de menores pérdidas de presión en tuberías.

Finalmente al término del presente trabajo se muestran las ventajas más importantes que trae consigo la implementación de colectores, así como recomendaciones que pueden ser útiles en caso de proseguir con una etapa experimental.

INTRODUCCION

En la actualidad México cuenta con una gran riqueza natural que puede ser aprovechada para generar considerables cantidades de electricidad, nos referimos a la energía geotérmica.

Los campos geotérmicos en México presentan la característica de ser reservorios del tipo "líquido dominante", lo que significa que son productores de una mezcla agua-vapor. Esta característica a implicado realizar numerosos estudios para analizar el comportamiento termodinámico de la mezcla debido a los parámetros de comportamiento que lo caracterizan.

La importancia de estos estudios radica en el hecho de que una vez que un pozo ha sido perforado es necesario conducir el fluido hasta la planta y ahí tras previa separación de las fases, alimentar la turbina con el vapor obtenido.

Por lo antes mencionado se realiza en el presente trabajo una comparación técnico-económica para la conducción de fluido geotérmico, en base a condiciones de operación previamente establecidas.

Las alternativas a considerar son las siguientes:

- a) Conducción del fluido bifásico a través de líneas independientes (líneas para vapor y para líquido saturado)
- b) Transporte de la mezcla geotérmica de varios pozos en una tubería única, por medio de un sistema de colectores.

Actualmente se utiliza la primer alternativa en la Planta geotérmica de Cerro Prieto I por lo que se conoce su diseño. De la segunda alternativa se desarrolla un estudio más detallado con el fin de hacer una estimación preliminar y decidir si es conveniente seguir con una etapa de experimentación, necesaria para obtener criterios de evaluación y diseño.

De aquí que el objetivo de este trabajo sea el de seleccionar la alternativa que refleje mayores beneficios en la conducción del fluido geotérmico en dos fases, con base a un criterio de decisión fundamentado en un análisis técnico que finalmente reditue en ventajas económicas.

El estudio se realiza aplicando técnicas de análisis y solución creativa tales como son los diagramas de causa y efecto, utilizando para este caso los diagramas de Ishikawa y Pareto.

Por esta razón este trabajo se ha dividido en 7 capítulos para alcanzar el objetivo propuesto.

Cap. I; Muestra un panorama breve de cuestiones básicas de Geotermia, tales como son, antecedentes, geología, capacidad instalada, equipos básicos de operación, pozos, etc.

Cap II; Se describen los métodos de transporte del fluido bifásico. Además de hacer una recopilación de los problemas, ventajas y desventajas que comúnmente se presentan al trabajar con un fluido en donde existe cambio de fase, y finalmente se explican los ciclos de trabajo que se utilizan en las Centrales Geotérmicas.

Cap III ; Se define el problema en base a características reales de operación, restricciones de trabajo y parámetros de comparación que se utilizan en el análisis de las diferentes alternativas.

Cap IV; Se presentan los métodos analíticos utilizados en el diseño de líneas de conducción, así como los criterios y consideraciones establecidas para llevar a cabo el análisis de cada una de las alternativas planteadas.

Cap V; Contiene tablas de resultados con información de la siguiente naturaleza: Arreglos finales, balances de energía, propiedades termodinámicas, diseño de tuberías, costo de equipos, obra civil, mantenimiento, etc.

Cap VI; Se analizan los resultados obtenidos para decidir cual alternativa presenta mayores ventajas tanto técnicas como económicas, y de ahí seleccionar la mejor y finalmente en el:

Cap VII; Se concluye sobre el resultado obtenido y se dan recomendaciones que se pueden tener presentes en caso que la alternativa analizada sea llevada a una etapa de experimentación.

CAPITULO I

GENERALIDADES SOBRE GEOTERMIA

La generación de energía eléctrica da la pauta a seguir en el desarrollo del país, de ahí la importancia que se da al estudio de Centrales Térmicas que cumplen con dicha función tales como: Termoeléctricas, Hidroeléctricas y Geotermoeléctricas.

El aprovechamiento de éstas resulta más ventajoso cuando uno de los elementos indispensables para efectuar el ciclo de trabajo se puede obtener directamente de la corteza terrestre, como es el caso de las Centrales Geotérmicas, tema sobre el cual se aboca el presente trabajo.

La atención que merecen las Centrales Geotérmicas radica en el hecho de que permiten desarrollar procesos de operación sin necesidad de consumir hidrocarburos, además que ofrecen la posibilidad de generar cantidades importantes de electricidad.

El principio de operación de una Planta Geotérmica es semejante al de una Termoeléctrica convencional, su diferencia básica es que el generador de vapor es sustituido por un yacimiento geotérmico y los pozos que producen dicho vapor, además de que el uso del vapor proveniente de los pozos una vez condensado permite prescindir de una fuente externa de agua en disponibilidad para reponer las pérdidas que se registran en la torre de enfriamiento [10]. El equipo de trabajo es el mismo para ambas variando solo en capacidades, la similitud se debe a que dichas plantas generadoras de electricidad operan con el mismo ciclo de trabajo, basado en la utilización directa del vapor por medio de un ciclo Rankine, con sus respectivas modificaciones.

No obstante las ventajas que ofrecen los campos Geotérmicos su uso resulta aún poco conocido en algunos países. A nivel mundial se tiene conocimiento de que la primer Planta Geotérmica se instaló a principios del Siglo XX en Larderello, Italia; Nueva Zelanda se convierte en el segundo país generador de energía geotérmica, seguidos posteriormente por Estados Unidos, México, Japón y la Unión Soviética [27].

La tabla (I.1) muestra la cantidad de energía eléctrica producida actualmente por medio de recursos geotérmicos. Se sabe que en 1984 la capacidad mundial fué de alrededor de 3500 MW, de éstos aproximadamente 1900 MW fueron de vapor seco, 1250 MW de evaporación simple, 360 MW de doble evaporación-separación y el resto de otros procesos [27].

PAIS	INSTALACION MW	CAPACIDAD EN EL FUTURO.
U.S.A.	1438.7	219.2
Filipinas	782.3	827.5
Italia	457.1	----
Japón	227.6	160
México	205.0	605
Nva. Zelanda	202.6	150
El Salvador	96.1	55
Indonesia	32.3	440
Kenya	30.0	15
U.R.S.S	11.0	---
China	5.1	---
Taiwan	3.0	---
Azores	3.0	---
Turkia	0.5	---

Tabla I.1 CAPACIDAD DE PLANTAS GEOTERMICAS
EN EL MUNDO.

I.1 CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO:

I.1.1 GEOLOGIA

La zona geotérmica de Cerro Prieto se localiza en el Valle de Mexicali. Tiene como punto de referencia geográfica la prominencia volcánica conocida con el mismo nombre.

El campo geotérmico se encuentra sobre un sistema de fallas escalonadas que pertenece a la serie de fracturas que cubren la mayor parte del estado de Baja California [17].

La geología de Cerro Prieto es la siguiente: a una profundidad de pocos Kms. se encuentra una masa de roca incandescente, remanente de la erupción de Cerro Prieto, sobre la que descansa una espesa capa granítica, denominada basamento, muy fracturada, ya que está localizada sobre el límite entre la Placa Norteamericana y la del Pacífico, integrado por el sistema de fallas de San Andrés. Por estas fisuras suben gases y vapores magmáticos que junto con la energía térmica transmitida por conducción a través de la roca, calientan el yacimiento. La parte superior de esta capa de granito tiene una profundidad variable, desde el punto en que aflora a la superficie en la Sierra de Cucapa, hasta unos seis kilómetros, en el centro del Valle quedando bajo el campo

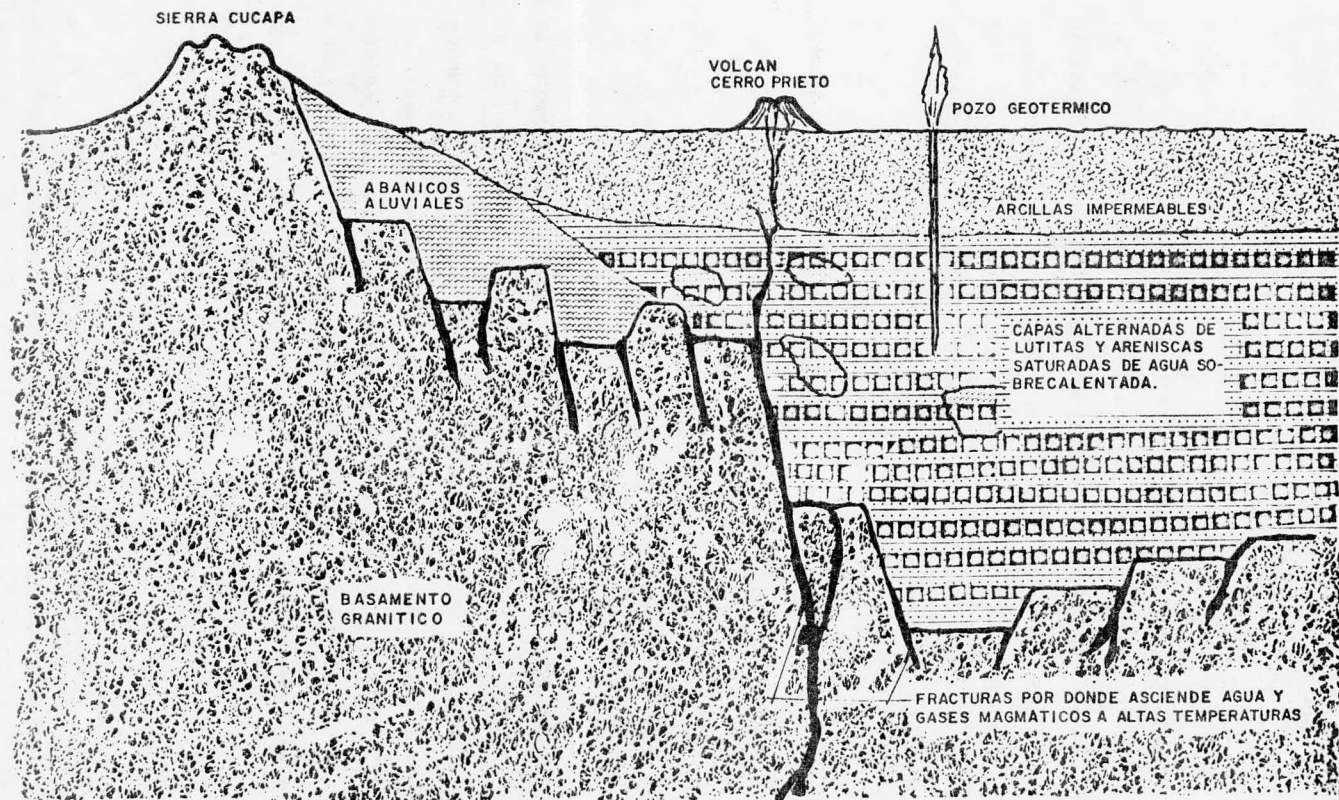


FIG. 1.1 CORTE DEL SUBSUELO DE LA ZONA GEOTERMICA DE CERRO PRIETO B. C. MEXICO.

geotérmico entre 2500 a 3500 metros de profundidad.

Sobre este estrato y hasta una profundidad de 700 metros se encuentra el acuífero formado por capas alternas de dos rocas lutitas y areniscas saturadas de agua sobrecalentada. Por último, desde la profundidad de 700 metros hasta la superficie del terreno hay una capa de arcillas impermeables, que impiden que se transfiera la energía y fluido del yacimiento a la superficie. La figura 1.1 muestra un corte del subsuelo de la zona geotérmica de Cerro Prieto.

I.1.2 CARACTERISTICAS DE OPERACION.

I.1.2.1 DESCRIPCION DEL ARREGLO.

Los pozos geotérmicos de Cerro Prieto arrojan a la superficie una mezcla de agua vapor, en la que predomina la fase líquida, para controlar el flujo de la mezcla se coloca en la cabeza del pozo un árbol de válvulas e inmediatamente después un separador centrífugo por el cual se hace pasar el fluido geotérmico, de donde el vapor sale por el conducto central y el agua separada por la parte inferior [ver fig.1.2]

El vapor separado es enviado por tuberías a la planta generadora pasando previamente por un secador el cual tiene la función de impedir el paso de sólidos provenientes del pozo a la turbina; con esto se evita la acumulación de concentraciones que son de carácter corrosivo y que posteriormente acarrearían problemas en tuberías y equipos.

Por otro lado el agua separada se hace pasar a través de 2 separadores, uno de presión intermedia y otro de baja presión. De nuevo el vapor circula por los secadores y finalmente llega a la unidad turbogeneradora, en donde una vez que el vapor ha cedido su energía cinética a los álabes es conducido al condensador.

Se observa además que inmediatamente a la salida del pozo se encuentra otro equipo conocido como silenciador el cual cumple con dos funciones. Una de ellas es actuar como equipo de seguridad para evitar las sobrepresiones, y la otra es la de eliminar el ruido al descargar el fluido a la atmósfera.

En la figura 1.2 se observa el ciclo de trabajo descrito.

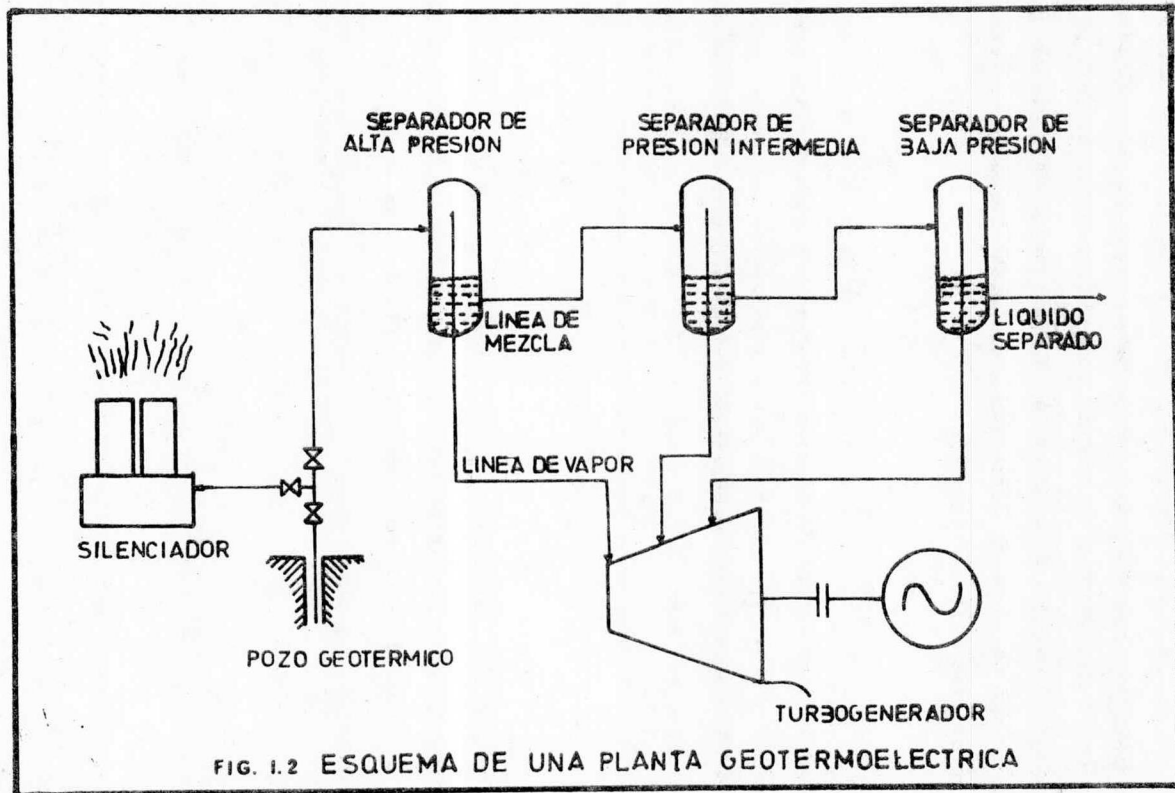


FIG. 1.2 ESQUEMA DE UNA PLANTA GEOTERMoeLECTRICA

1.1.2.2 EQUIPO DE SUPERFICIE

El equipo requerido para cierre y control de flujo de los pozos junto con el equipo de separación de la mezcla constituyen el equipo de superficie [1]

- Arbol de válvulas: antes de poner en servicio el pozo, se coloca en la descarga del mismo un juego de válvulas el cual consiste de tres válvulas de compuerta.

- Separadores: cuando la producción del pozo no es vapor sino una mezcla agua-vapor es necesaria la utilización de separadores. Para que la acción separadora sea eficiente se debe seleccionar cuidadosamente el tipo de separador a emplear puesto que las características de descarga de cada uno de los pozos son diferentes y estas afectan directamente las variables de diseño.

Los separadores han sido estudiados y desarrollados en tal forma que se ha llegado a uno que satisface las condiciones de operación de un Campo Geotérmico. El separador mencionado es el conocido como ciclónico tipo Webre y su funcionamiento se puede explicar de la siguiente manera (ver figura 1.3): al introducir la mezcla inicialmente sigue una trayectoria ascendente y después desciende realizando un giro de 180 grados por una salida vertical en el centro del cuerpo el separador.

La separación de la mezcla es en base a la diferencia de densidades entre el agua y el vapor.

Las razones por las cuales se ha seleccionado el separador tipo Webre son las siguientes [1]:

- 1) La acción separadora se cumple satisfactoriamente ya que llega a tener una calidad superior al 99.5
- 2) No tiene ningún elemento interno móvil que se pueda erosionar o corroer.
- 3) El vapor sale por la parte inferior del mismo, facilitando la instalación de la tubería de conducción a la planta y;
- 4) En base a pruebas se han optimizado sus dimensiones.

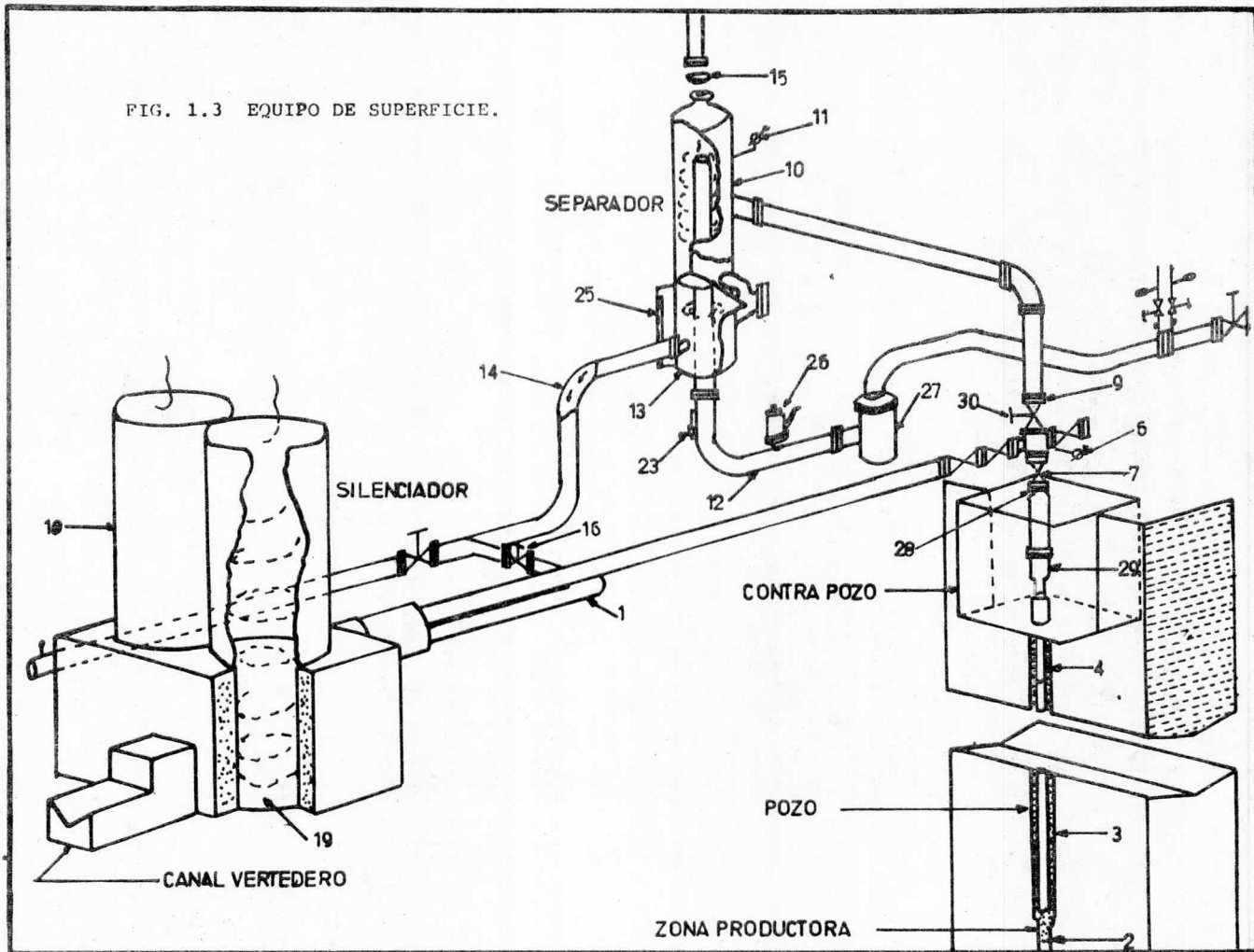
- Silenciadores: se utilizan para atenuar el ruido que produce el fluido al ser descargado a la atmósfera. Las descargas se producen cuando se tiene a prueba el pozo o bien cuando existe una sobrecarga en la planta. Los tipos de silenciadores más empleados son los de salida sumergida y los de tipo horizontal. En algunos pozos no es posible utilizar éste último debido a la gran cantidad de sales contenidas en el agua separada, las cuales al precipitarse obstruyen la salida.

En la figura 1.3 se observa un arreglo del equipo de superficie característico de una central geotérmica.

Las partes que componen el arreglo mostrado son las siguientes:

- 1.- Estratos productores, arenas y areniscas con diferentes consistencias.
- 2.- Tubería ranurada
- 3.- Tubería de recubrimiento
- 4.- Tubería conductora
- 5.- Contrapozo
- 6.- Presión en la cabeza del pozo
- 7.- Válvula maestra
- 8.- Arbol de válvulas
- 9.- Orificio de regulación
- 10.- Separador Centrifugo
- 11.- Presión de separación
- 12.- Línea de descarga de vapor separado
- 13.- Cámara de nivel
- 14.- Agua separada
- 15.- Disco de rompimiento
- 16.- Válvula de regulación de agua separada
- 17.- Derivación para agua separada
- 18.- Silenciador doble vertical
- 19.- Agua separada a la presión atmosférica
- 20.- Vertedero para medición de agua separada
- 21.- Indicador de nivel para medición de agua separada
- 22.- Registrador continuo de presión
- 23.- Calorímetro
- 24.- Orificio para medición de vapor separado
- 25.- Indicador de nivel de agua en el separador
- 26.- Válvula de seguridad
- 27.- Válvula de esfera
- 28.- Carrete de expansión
- 29.- Cabezal
- 30.- Válvula de regulación
- 31.- Columna diferencial

FIG. 1.3 EQUIPO DE SUPERFICIE.



I.1.3 CAPACIDAD INSTALADA.

Nuestro país cuenta en la actualidad con una de las tecnologías más avanzadas en la explotación de Campos Geotérmicos del tipo "líquido dominante" lo cual se refleja en la capacidad instalada en Cerro Prieto.

Es a partir de 1973 cuando se inicia la generación de energía eléctrica por medio de 2 turbogeneradores de 37.5 MW cada uno, posteriormente se introdujeron dos unidades más con las mismas características y finalmente una quinta unidad de baja presión con una capacidad de 30 MW, contando por lo tanto en la actualidad con una capacidad total instalada de 180 Mw, para la planta de Cerro Prieto I [2]. Posteriormente se construyó Cerro Prieto II y Cerro Prieto III, los que cuentan con cuatro unidades geotermoeléctricas de 110 MW cada una, lo que permitió incrementar la capacidad instalada a 645 MW.

Otro estado que ha presentado también importantes manifestaciones termales es Michoacán y en la actualidad cuenta con 5 plantas a pie de pozo con capacidad de 5 MW cada una.

En la tabla 1.2 se muestran las Centrales Geotérmicas más importantes que existen en México, así como de las programadas para un futuro cercano, y con las que se espera obtener un incremento importante de energía eléctrica [2].

NOMBRE	AÑO	MW	ESTADO
CERRO PRIETO I			
unidad 1	1973	37.5	operando
unidad 2	1973	37.5	operando
unidad 3	1979	37.5	operando
unidad 4	1971	37.5	operando
unidad 5	1981	30.0	operando
CERRO PRIETO II			
unidad 1	1984	110	operando
unidad 2	1984	110	operando
CERRO PRIETO III			
unidad 1	1984	110	operando
unidad 2	1985	110	operando
LOS AZUFRES			
unidad a pie de pozo 1	1982	5	operando
unidad a pie de pozo 2	1982	5	operando
unidad a pie de pozo 3	1982	5	operando
unidad a pie de pozo 4	1982	5	operando
unidad a pie de pozo 5	1982	5	operando
LOS AZUFRES			
unidad 1	1988	55	programada
unidad 2	1988	55	programada

TABLA 1.2
CAPACIDAD DE LAS PLANTAS GEOTERMICAS
EN MEXICO

CAPITULO II

ANTECEDENTES DE LA CONDUCCION DE FLUIDO GEOTERMICO

El fluido geotérmico es una mezcla bifásica de agua-vapor, que contiene gases disueltos y salmuera con sólidos en suspensión.

El conocimiento de las características de una mezcla geotérmica permite obtener resultados favorables en el desarrollo del proceso de generación de energía eléctrica. Es decir, la interdependencia entre los parámetros, tales como: temperatura, presión, flujo, concentraciones de sustancias químicas, etc., son importantes para interpretar cualquier proceso de trabajo, como en el caso de Cerro Prieto [19].

Las características físicas de la mezcla de cada pozo geotérmico son determinantes también para evaluar las posibilidades de explotación y aprovechamiento de cada uno de ellos. Lo anterior no implica que solo resulte difícil el manejo del fluido geotérmico durante la extracción, ya que una vez que llega a la superficie es necesario conducirlo a la casa de máquinas en donde el vapor obtenido es utilizado para accionar la turbina.

La construcción adecuada de un sistema de conducción superficial es necesaria para entregar la producción del fluido geotérmico. La selección de la distribución de los sistemas involucra decisiones, las principales son [7].

- a) La termodinámica del fluido a través de los ductos.
- b) La base del diseño mecánico, permitiendo llevar a cabo la función de las líneas de tuberías.
- c) El material utilizado para minimizar la corrosión y la erosión.
- d) La previsión de dispositivos de seguridad.

El diseño de las líneas de conducción requeridas para el vapor seco, agua o una mezcla en dos fases, depende de la naturaleza de producción del pozo y del ciclo de trabajo.

Inicialmente se observó que el manejo más sencillo del fluido geotérmico se tiene cuando el pozo geotérmico entrega únicamente vapor. Sin embargo en nuestro país resulta más común tener pozos productores de mezcla bifásica, lo cual ha hecho necesario analizar el comportamiento de ésta en la práctica para mejorar paulatinamente los métodos de separación de cada una de las fases.

El primer ciclo de trabajo que se llevó a cabo consistía en rechazar la fase líquida y conducir el vapor saturado a la turbina. Posteriormente se observó que el líquido puede ser separado parcialmente por medio de un estrangulamiento y producir vapor, el cual se expande y produce energía adicional, ésta es la razón por la cual se agregó una línea de separación de líquido. Con la existencia de dos líneas de tuberías en gran proximidad en la que cada una transportaba una fase diferente, surgió la pregunta de que si existiría la posibilidad de conducir un fluido en dos fases en una sola tubería. Los experimentos realizados para tal fin fueron positivos y la decisión de adoptar la conducción del flujo en dos fases surgió de la experiencia de transmitir vapor ligeramente húmedo [7].

Una desventaja para esta forma de conducción es la de tener altas velocidades de las fases en válvulas y codos de la tubería, así como el ruido excesivo y vibraciones en la misma.

Para tener una visión más amplia del desarrollo que ha tenido la conducción del fluido geotérmico es necesario recurrir a los ciclos térmicos que comúnmente se utilizan.

II.1 CICLOS TERMICOS.

Cuando una cierta masa de un fluido de trabajo en un estado particular pasa por una serie de procesos, es decir, si una o más de sus propiedades termodinámicas cambian; y finalmente regresa a su estado inicial, se dice que sufre un ciclo [9].

Una de las características principales de la mayoría de los ciclos térmicos utilizados en la generación de energía eléctrica a partir de la energía geotérmica es que son ciclos abiertos, lo que significa que el fluido de trabajo no sigue una trayectoria cerrada bien definida. Para nuestro caso el fluido es extraído del subsuelo, conducido a la planta de generación eléctrica en donde accion la turbina y finalmente es desechado o utilizado como agua de enfriamiento.

De acuerdo al arreglo del equipo y a las características geotérmicas existen variantes de los ciclos térmicos, en la tabla (II.1) se muestran los que más se utilizan para la generación de energía eléctrica por medio de fluido geotérmico.

TABLA II.1

CICLO	OBSERVACIONES
Ciclo de contrapresión	<ul style="list-style-type: none"> -Alimentación de la turbina con el vapor obtenido por medio de un separador de partículas sólidas, donde el polvo y la humedad son eliminados, desechándolos a la atmósfera o a la planta. -No requiere equipo de condensación -Reducido costo. -Rendimiento menor que el de otros ciclos.
Ciclo de vapor seco, con condensador	<ul style="list-style-type: none"> -Utilización de turbina y Condensador. -Condensación y enfriamiento del agua con el sistema necesario. -Rendimiento mucho mayor que el del ciclo anterior.
Ciclo de simple evaporación	<ul style="list-style-type: none"> -Alimentación de la turbina con el vapor obtenido por medio de un separador, conduciendo posteriormente el vapor al condensador. -La salmuera se reinyecta a la tierra. -Gran cantidad de salmuera es conducida.
Ciclo doble evaporación.	<ul style="list-style-type: none"> -Se añade producción de vapor repitiendo la evaporación del agua sobrante. -Alimentación del vapor a una etapa intermedia de la turbina. -Eficiencia alrededor del 20% más que el de simple evaporación. -Sistema complejo. -Alta inversión inicial.
Ciclo binario	<ul style="list-style-type: none"> -Ciclo Rankine, trabaja con fluido caliente el cual transfiere su calor a otro fluido. -Se usan hidrocarburos con bajo punto de ebullición -El fluido geotérmico no entra a la turbina.

En la tabla (II.2) se muestra el equipo de que consta cada uno de los ciclos mencionados, además del arreglo y el tipo de fluido que maneja .

CICLO	UNIDAD DE CONTROL	FLUJO CONDUCIDO
Contrapresión	Control de presión	Vapor o mezcla.
Condensación	Control de presión Control de nivel	Vapor
Simple evaporación	Control de presión Control de flujo Control de temperatura	Mezcla
Doble evaporación	Control de presión Control de flujo Control de temperatura	Mezcla
Ciclo binario		Agua o fluido secundario

CICLO	SEPARADORES	SECADOR	CONDENSADOR
Contrapresión	1 a pie de pozo	1	0
Condensación	1 a pie de pozo	1	1
Simple evaporación	1 evaporador-separador	1	1
Doble evaporación	2 evaporadores-separadores	1	1
Ciclo binario	1 intercambiador de calor	1 bomba	

TABLA II.2

II.2 CONDUCCION DE VAPOR:

De acuerdo a las características del reservorio a explotar, ya sea del tipo vapor dominante o líquido dominante es el ciclo que se utilice para aprovechar la energía del fluido geotérmico.

Cuando se habla del vapor dominante significa que el pozo entrega vapor seco y existe entonces la ventaja de no ser necesario el uso de separadores de mezcla a pie de pozo, pero si se requiere un separador de impurezas que elimine la mezcla de gases y sólidos indeseables contenidos en el vapor y posteriormente enviarlo a la casa de máquinas en donde será descargado a la turbina.

De lo anterior se observa que el ciclo del trabajo y método de conducción del vapor son muy sencillos cuando el fluido del trabajo resulta ser monofásico.

En éstos casos los factores de mayor importancia son las velocidades del fluido dentro de la tubería así como las caídas de presión a lo largo de la misma.

Controlando adecuadamente éstos parámetros se asegura una conducción satisfactoria del vapor.

Se tiene además la ventaja de que la selección y diseño de los vaporductos resulta fácil, por el comportamiento conocido del vapor, así como por sus propiedades termodinámicas para diferentes condiciones de trabajo.

El hablar de reservorios del tipo líquido dominante significa que el producto del pozo es una mezcla en dos fases.

Para estos casos se recurre a la utilización de separadores, los cuales comúnmente se localizan en la cabeza del pozo, siendo su función la de entregar vapor con una calidad de aproximadamente 99.9%.

Cuando la mezcla geotérmica sufre el proceso de separación, el vapor resultante se conduce a la planta en donde es descargado a la turbina. En tanto el agua que no se evapora, y que se conoce como agua separada, se analiza de manera independiente del vapor obtenido. Posteriormente el agua separada puede ser utilizada para alimentar otro evaporador-separador, o bien desecharse a una laguna de evaporación.

II.3 CONDUCCION DE AGUA SEPARADA

El agua separada se caracteriza por la tendencia que tiene a transformarse en una mezcla bifásica, razón por la cual muestra un comportamiento complejo al ser conducida [30].

La figura 2.1 muestra el mecanismo de caídas de presión característico en un fluido con alta presión y temperatura (formación de dos fases).

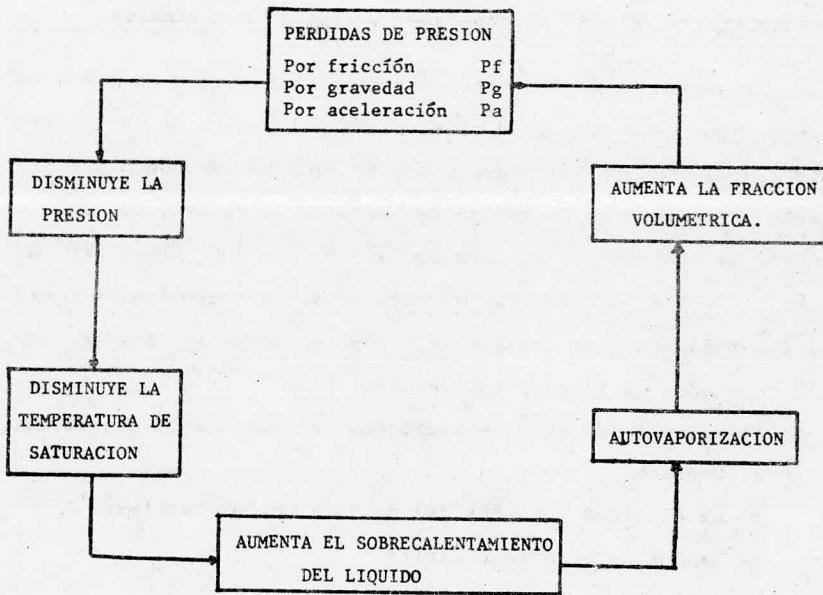


Fig. 2.1 MECANISMO DE LAS PERDIDAS DE PRESION EN TUBERIAS CONDUCIENDO UNA MEZCLA AGUA-VAPOR

Algunos obstáculos que se presentan en las líneas diseñadas para conducir agua en condiciones de saturación es que aparecen fenómenos como son: flujo sónico, choques térmicos y varios problemas inherentes al fluido que se menciona. Aparentemente, estos fenómenos indeseables se presentan cuando en una tubería diseñada para transportar una fase (líquido o vapor) se presenta una diferente. Lo anterior significa que para conducir y aprovechar al máximo el agua separada es necesario diseñar tuberías que sean capaces de transportar el fluido en dos fases y resitir sus efectos.

La presencia de los fenómenos mencionados se debe a que se tiene agua saturada la cual al fluir a lo largo de la tubería pierde presión, lo que provoca que el agua se evapore y por lo tanto se inicie la formación de burbujas de vapor, teniendo a partir de ese momento la presencia de la dos fases en la tubería. Los parámetros que gobiernan el comportamiento del fluido bifásico son numerosos, los principales pueden ser seleccionados de la siguiente manera [4]:

- 1) Relación de flujo volumétrico de cada una de las fases.
- 2) Presión.
- 3) La densidad y viscosidad de cada una de las fases.
- 4) Rangos de velocidad límite.
- 5) La geometría de la tubería.

- 6) Las características dimensionales de la tubería
- 7) El ángulo de la tubería con respecto a la horizontal.
- 8) La dirección del flujo.
- 9) El diámetro de entrada.
- 10) La cantidad de fluido.

II.3.1 PATRONES DE FLUJO

Con objeto de clasificar las diferentes distribuciones de las fases (Líquido-vapor) bajo un comportamiento similar, se han establecido distribuciones típicas comúnmente llamadas patrones de flujo. Evidentemente la uniformidad de los patrones de flujo no se realiza jamás debido al carácter aleatorio del fenómeno, dichos patrones se forman para idealizar al flujo en un instante determinado. Los principales patrones de flujo establecidos para tuberías horizontales han sido más complicados que los de tuberías verticales, ya que en los primeros se presenta la acción de la gravedad sobre el flujo lo que provoca una distribución asimétrica de las fases y una estratificación horizontal.

Los patrones de flujo establecidos para tuberías horizontales son los siguientes [4]:

-Flujo Burbujeante: las burbujas de vapor se mueven en la parte alta de la tubería y se desplazan con una velocidad mayor que la del líquido, se considera el vapor como una fase dispersa y el líquido como una fase continua.

-Flujo Alternante: al incrementarse la relación de vapor, las burbujas se integran y forman bolsas de gas que ocupan prácticamente la totalidad de la tubería, y que fluyen a una velocidad mayor que el líquido; es decir las fases parecen moverse alternadamente.

-Flujo Estratificado: al aumentar de tamaño las burbujas de vapor, llenan por completo la parte superior del tubo y el líquido fluye en la parte inferior con una interfase bien definida, lo que significa que hay una completa separación de las fases.

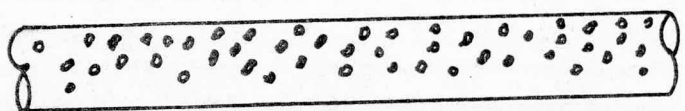
-Flujo Ondulado: al incrementarse el flujo de vapor y la velocidad del mismo se presentan olas sobre la superficie del líquido que se desplazan en la dirección del flujo.

-Flujo Pulsante: la velocidad del vapor continua incrementandose y las olas llegan a alcanzar una gran amplitud hasta llegar a abarcar toda la sección del tubo. El líquido es levantado por el movimiento rápido del gas formando tapones que se desplazan a una velocidad mucho menor que la del vapor.

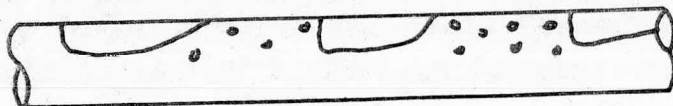
-Flujo Anular: al aumentar la cantidad de vapor las fuerzas gravitacionales ceden ante las fuerzas viscosas obligando al líquido a fluir como una película pegada a las paredes de la tubería, mientras que el gas se mueve por el centro. En este patrón el gas se desplaza a una velocidad alta arrastrando al líquido que se encuentra suspendido en forma de gotas pequeñas en él y con transferencia de masa de la película del líquido al vapor.

-Flujo Disperso: cuando el flujo de vapor se incrementa considerablemente, existe un aumento gradual del arrastre del líquido en forma de gotas hasta que la mayor parte de la película líquida se dispersa en forma de gotas en la fase gaseosa y se mueve a la misma velocidad que el gas pudiéndose considerar la mezcla resultante como una dispersión homogénea.

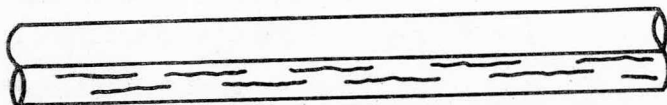
En la figura 2.2 se muestran los patrones de flujo mencionados para tuberías horizontales.



FLUJO BURBUJEANTE DISPERSO



FLUJO ALTERNANTE



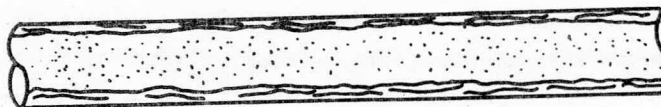
FLUJO ESTRATIFICADO LISO



FLUJO ESTRATIFICADO ONDULADO



FLUJO PULSANTE



FLUJO ANULAR

FIG. 22 PATRONES DE FLUJO EN TUBOS HORIZONTALES (TAITEL Y DUKLER, 1978)

Las observaciones de los patrones de flujo son guiadas a la construcción de los diagramas de patrones de flujo con el propósito de mostrar el límite de dichos patrones en base a un grupo de propiedades que son de significativa importancia. El diagrama que más se ocupa debido a su gran simplicidad y exactitud es el de Mandhane; éste diagrama caracteriza a los distintos patrones de flujo en función de la velocidad superficial de cada una de las fases.

El diagrama de Mandhane se muestra en la figura 2.3. Para utilizarlo se requiere únicamente la velocidad superficial del líquido y la velocidad superficial del vapor, que se calculan de la siguiente manera:

$$V_{SL} = \frac{W_L}{\rho_L A} = \frac{W_T (1-X)}{\rho_L A} = \frac{G_T (1-X)}{\rho_L}$$

$$V_{SV} = \frac{W_V}{\rho_V A} = \frac{W_T X}{\rho_V A} = \frac{G_T X}{\rho_V}$$

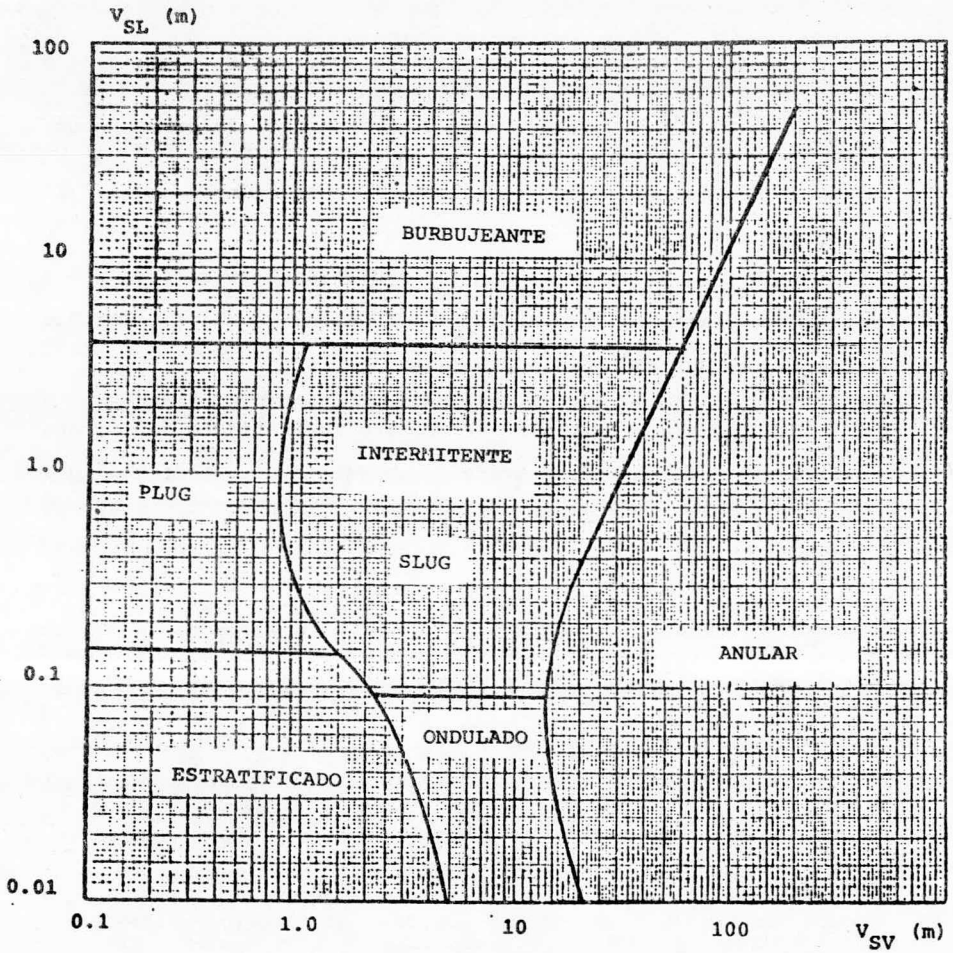


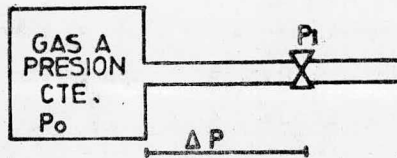
FIG 23 DIAGRAMA DE MANDHANE PARA DETERMINAR PATRONES DE FLUJO EN TUBERIAS HORIZONTALES.

II.3.2 FLUJO CRITICO

Otro fenómeno que se presenta al conducir mezcla en dos fases es la ocurrencia del flujo sónico

Los parámetros que están directamente relacionados con este fenómeno son las caídas de presión, la velocidad del sonido en la mezcla, la calidad del vapor, la densidad y la relación de flujo másico [12].

Analizando un arreglo con las siguientes características se observa que:



Al conducir el gas que se encuentra en el recipiente, a presión constante, a lo largo de la tubería se presentan pérdidas de presión por longitud (pérdidas primarias), cuando el fluido circula a través de la válvula dichas pérdidas se incrementan. Este proceso de caídas de presión debe ser controlado para evitar la presencia del flujo sónico, el cual se caracteriza en que la velocidad del fluido se iguala a la del sonido y en ese momento se generan inestabilidades en el

sistema. Este fenómeno es un parámetro de gran significación en el diseño de tuberías conductoras de fluido en dos fases.

Para evitarlo se han establecido límites en la relación de presión inicial y final, para el caso del aire es la siguiente:

$$\frac{P_1}{P_0} = 0.5283 \qquad P_1 = P_C = \text{Presión crítica.}$$

Cuando se llega a esta condición se dice que la presión es crítica. En ese momento el flujo másico se comporta de manera independiente de la caída de presión dado que se está manejando un flujo sónico, éste estado provoca que el sistema trabaje en condiciones no deseables por la pérdida del control en el mismo.

El comportamiento del flujo a través de la tubería en función de la presión y con existencia de flujo crítico se muestra en al figura 2.4.

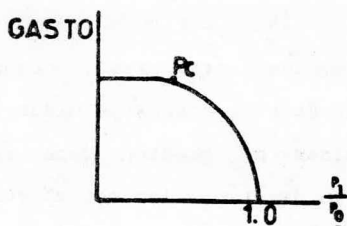


Fig. 2.4 Comportamiento de flujo crítico.

Cuando:

$$\frac{P_1}{P_0} > 0.5283 \quad \text{no hay flujo crítico, por lo tanto depende de } \Delta P.$$

$$\frac{P_1}{P_0} < 0.5283 \quad \text{existe flujo crítico y es independiente de } \Delta P.$$

La interpretación de la grafica es la siguiente:

La curva que se observa en la gráfica es representativa del comportamiento del flujo antes de llegar al estado de flujo crítico (P_c), dicha curva delimita el rango en el cual es posible trabajar con la seguridad de lograr una conducción del fluido sin problemas. Cuando la relación de presiones alcanza el valor de P_c se tiene que el comportamiento del flujo es el mostrado en la parte izquierda del diagrama. A partir de ese momento el flujo permanecerá constante independientemente de la variación de presión que exista.

En las líneas de conducción de fluido geotérmico este fenómeno ha tomado dimensiones de gran importancia. Dado que cada pozo tiene una producción determinada existe por lo tanto un control de la cantidad de vapor que se debe suministrar a la turbina. Si en condiciones de operación se llega inesperadamente al estado de flujo sónico se generan problemas, por la imposibilidad de poder suministrar la cantidad de vapor requerido por medio de la apertura de las válvulas puesto que el flujo ya no depende de la presión existente en el sistema. Lo que significa que la turbina bajará su rendimiento dadas las condiciones de trabajo a que es sometida

II.3.3 INCRUSTACIONES

En los campos geotérmicos está limitada la disposición superficial del agua separada por el contenido de sales que rebasa los límites permitidos de descarga dada la cantidad de incrustaciones que provoca en los silenciadores, separadores, válvulas, tuberías de conducción, canales, etc [25].

La salmuera geotérmica de Cerro Prieto se caracteriza por su alto contenido de cloruros alcalinos, principalmente cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl); además del elevado contenido de sílice. La sílice se encuentra en los yacimientos geotérmicos disuelta y en equilibrio termodinámico, pero en la extracción al disminuir la presión y/o temperatura queda en condiciones de sobresaturación, termodinámicamente inestable. Según las condiciones de extracción, de separación y de otros componentes del agua, la sílice en equilibrio tenderá a otro estado formando polímeros que pueden crecer y precipitarse como sílice coloidal y/o depositarse sobre la superficie formando incrustaciones de sílice vítrea.

Cuando la salmuera se somete a procesos de enfriamiento ocurre la precipitación de la sílice debido a la sobresaturación alcanzada y ésta precipitación solo es controlada por medio de la solubilidad de la sílice [24].

En la figura 2.5 se observa la relación que existe entre la solubilidad del cuarzo y la temperatura.

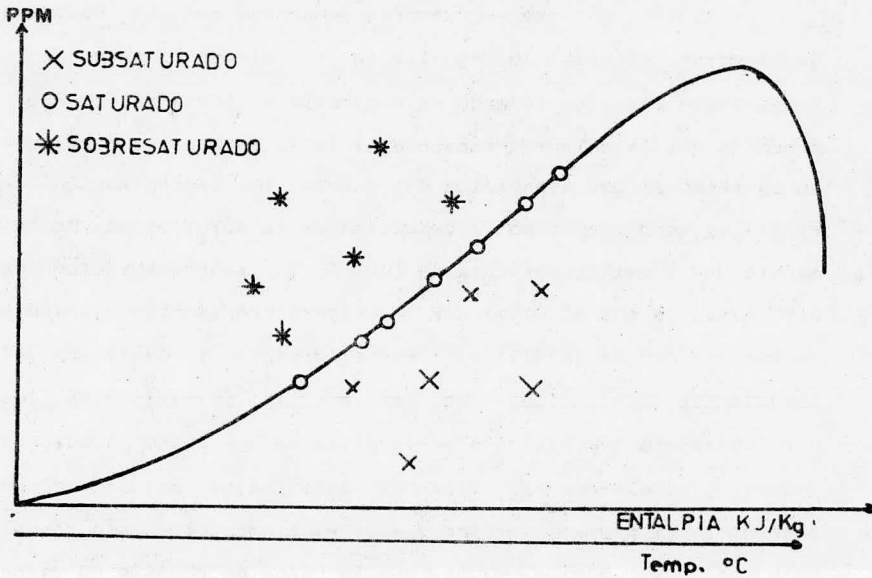


Fig. 2.5 Diagrama Silíce-Temperatura

En los puntos X y O no existen problemas serios; en los puntos * se presenta la formación de concentraciones por sobresaturación las cuales finalmente se depositan sobre los equipos de trabajo. Por ésta razón se debe mantener un control sobre las incrustaciones para asegurar que el vapor que llega a la turbina tenga un contenido de sólidos totales mínimo [39].

De manera general el proceso que se realiza en la formación de concentraciones es el siguiente:

La sílice que se encuentra contenido en la salmuera geotérmica alcanza su equilibrio en el yacimiento a la temperatura más alta (cuando se encuentra en forma de cuarzo). A medida que la salmuera asciende hacia la superficie disminuye su temperatura por separación del vapor, la concentración de sílice da como resultado la reducción de la solubilidad, de tal manera que a una temperatura de 100 °C la sobresaturación es muy alta, ya que al disminuir la temperatura también disminuye la solubilidad de la sílice. Posteriormente y debido a la turbulencia del flujo se favorece la formación de las partículas, la depositación se localiza en un punto donde se reduce gradualmente el área de paso hasta actuar como un orificio. El proceso termina cuando el tramo incrustado con el área de paso mínima es tal que la caída de presión en dicho tramo hace que la tubería no tenga capacidad de conducción, lo cual se va a detectar por la elevación de nivel en el separador primario.

Con la explicación anterior se puede concluir que las incrustaciones se ven incrementadas a bajas temperaturas y presiones y constituyen uno de los mayores problemas en el campo geotérmico de Cerro Prieto.

Los factores anteriormente mencionados son un indicativo de la problemática que trae consigo el análisis de agua separada. Sin embargo su estudio es necesario para plantear alternativas en la conducción de la misma para asegurar la funcionalidad de una Central Geotérmica.

CAPITULO III

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El análisis de los sistemas de conducción de mezcla bifásica se hace para el caso específico de la Central Geotérmica de Cerro Prieto II.

La Central cuenta en la actualidad con una red de vaporductos que se encargan del suministro del vapor a las turbinas. El ciclo de trabajo que se utiliza actualmente se describe a continuación.

Al extraerse el fluido geotérmico de los pozos se hace pasar a través de dos separadores, realizándose un proceso de doble evaporación-separación, siendo el primero de ellos de alta presión y el segundo de baja. Cuando se tiene el vapor

total de los pozos se colecta y se conduce a la casa de máquinas por medio de dos líneas independientes (una de baja y otra de alta presión). En tanto el agua remanente se descarga a un canal, existiendo uno por cada pozo, los cuales finalmente convergen a un canal de riego principal y éste a su vez descarga en la laguna de evaporación. La figura 3.1 esquematiza el proceso antes mencionado.

Ahora en base a un estudio detallado se pretende generar nuevas alternativas para el manejo y aprovechamiento de la mezcla en dos fases. El presente trabajo tendrá la característica de enfocar el problema desde el punto de vista de utilización de colectores. Para implementar el sistema de colectores se toma como base la ubicación de los pozos de la Central Geotérmica de Cerro Prieto II, la cual cuenta con un total de 25 pozos que se encargan de suministrar vapor a dos unidades turbogeneradoras de 110 MW cada una.

Por simplificación únicamente consideran aquellos pozos que alimentan la segunda unidad, considerando que el comportamiento para la primera es análogo.

Otro punto a considerar es la determinación de la cantidad de pozos geotérmicos que requiere cada unidad para generar 110 MW, éste punto se resuelve efectuando un balance térmico por medio del cual se determina la potencia que se genera con el flujo de vapor de un pozo, multiplicando posteriormente para obtener el total de pozos.

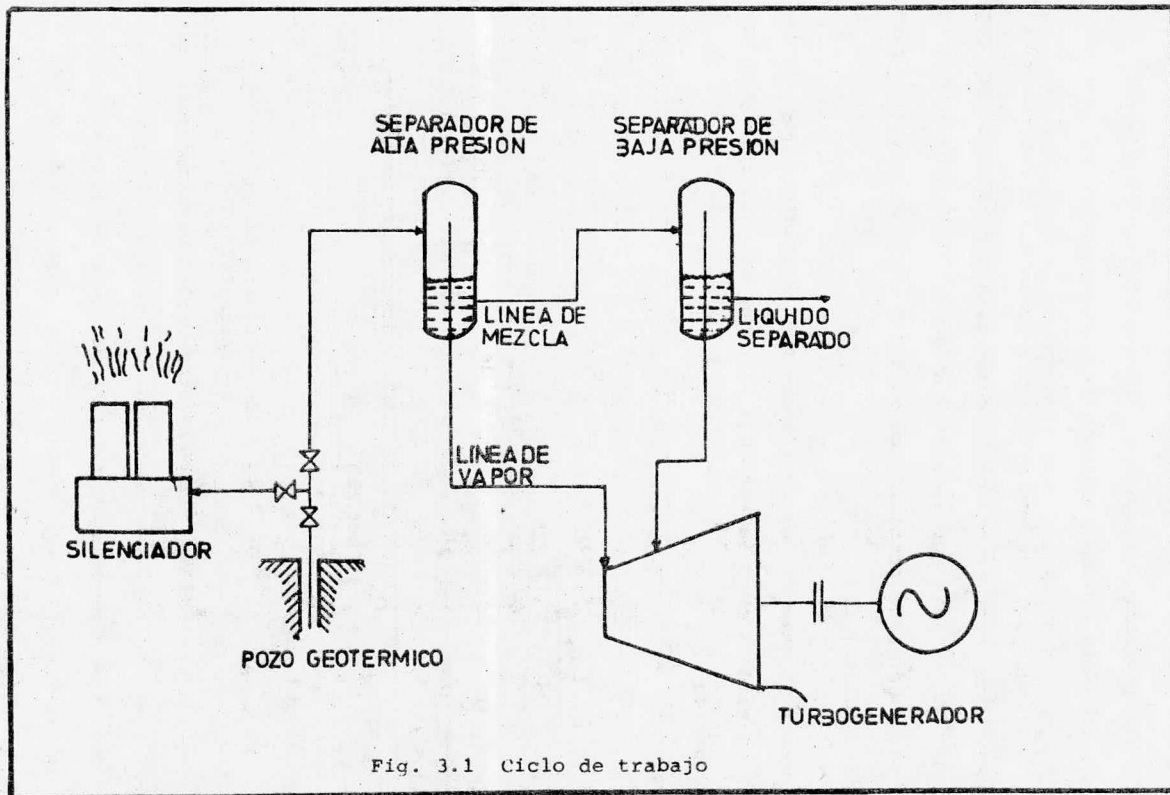


Fig. 3.1 Ciclo de trabajo

Las propiedades termodinámicas de los pozos seleccionados para la implementación de colectores se muestran en el anexo 1.

Con éstos pozos se generan las posibles alternativas para colectar mezcla, las que posteriormente se describen con mayores detalles.

En cada uno de los arreglos se pretende determinar las características de los métodos de regulación y protección a instalar en el sistema de conducción de mezcla y de vapor respectivamente, así como establecer la forma de operación de los mismos de tal manera que se pueda realizar una operación segura y confiable de la unidad turbogeneradora.

Cabe mencionar que la necesidad de utilizar colectores no es justificable solo por el hecho de hacer más fácil el manejo del vapor, la razón verdadera es la de colectar la mezcla en dos fases obtenida de los pozos y conducirla a una planta de evaporación en donde será fácil a su vez manejar el agua de desecho y llevarla por una sola línea, a la laguna de evaporación. Medida con la cual se pretende disminuir la contaminación que se ha dado en los canales de agua de riego al conducir el agua desechada por los mismos.

III.1 ALTERNATIVAS A ANALIZAR.

Las alternativas que se plantean para conducir el fluido geotermico son las siguientes:

- Alternativa A:

La mezcla en dos fases se colecta en un ramal único, y el agua separada se conduce por una línea.

- Alternativa B:

La mezcla se colecta en varios ramales, al igual que el vapor y el agua separada.

- Alternativa C:

El vapor se colecta y el agua separada se conduce por líneas independientes.

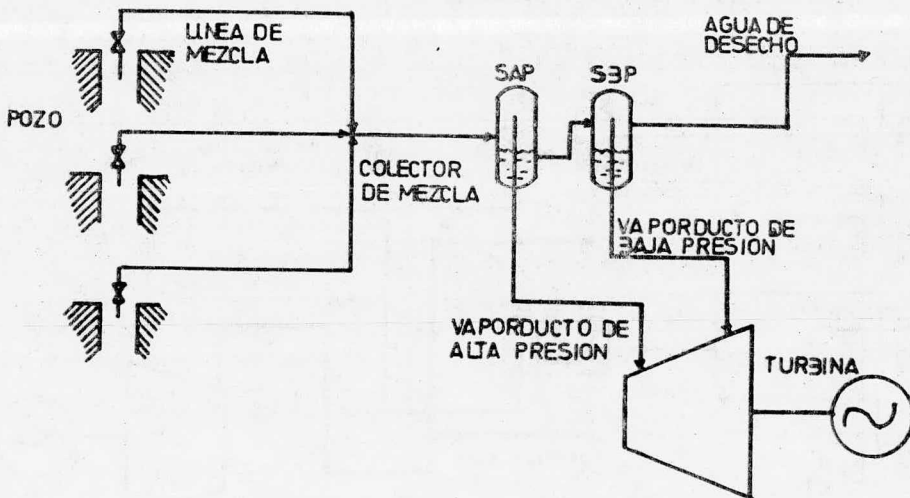
- Alternativa D:

Colección del vapor y desecho del agua separada a los canales de riego.

Alternativa A:

Se conduce la mezcla producto de varios pozos por una sola línea, hasta el lugar seleccionado para colocar los separadores de baja y alta presión respectivamente. El vapor obtenido en la separación se lleva a la turbina, en tanto que el total de agua separada se conduce por una sola línea a la laguna de evaporación.

Es importante hacer notar que el número de separadores es reducido aunque los que se instalen requieren de un diseño especial, por la cantidad de mezcla que van a manejar.

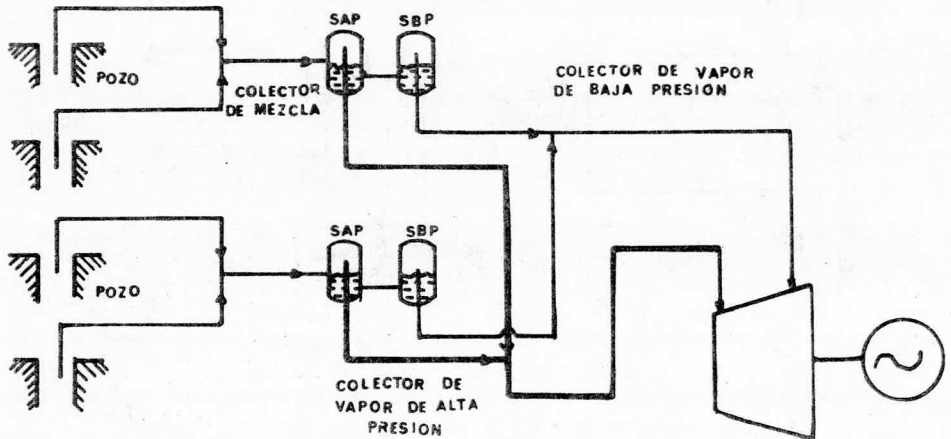


Alternativa B:

El número de pozos que se colectan es menor y existe por lo tanto mayor número de ramales. Esto tiene la ventaja de que se podrán colectar aquellos pozos que tengan condiciones de trabajo afines.

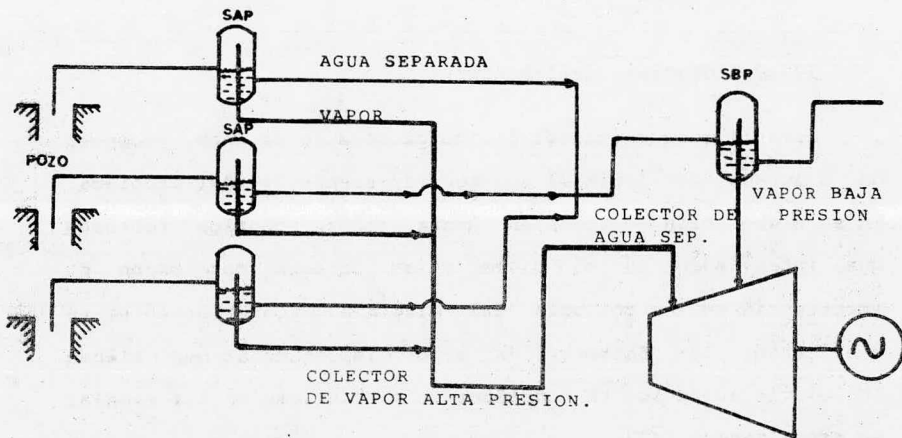
En esta alternativa primero se colecta la mezcla y se hace pasar por los separadores con un ciclo de doble evaporación-separación, posteriormente se colecta el vapor obtenido de cada uno de los colectores de mezcla, para transportarlo por un vaporducto principal.

Finalmente en agua de desecho también se colecta y se lleva a la laguna de evaporación.



Alternativa C:

Se coloca un separador en la salida de cada uno de los pozos. El vapor se transporta por un ramal principal a la turbina, en tanto que el agua separada se lleva a un separador de baja presión; en la figura se observa que por cada separador existe una tubería de agua, el producto de cada uno de ellos se colecta poco antes de entrar al segundo separador.



Alternativa D:

Esta alternativa se tendrá presente solo para fines de comparación, y como se menciona al principio de éste capítulo es la que actualmente funciona en Cerro Prieto II, pero no se incluye en el análisis.

III.2 ENFOQUE DEL PROBLEMA.

Una vez que se plantea el problema es necesario identificar los factores de mayor significación dentro del mismo para poder solucionarlo. Con éste fin se ha recurrido al diagrama causa-efecto, que es un método muy simple y fácil de usar en la solución de problemas. Este diagrama también es conocido como diagrama de Ishikawa ó esqueleto de pescado por la forma en que se elabora.

III.2.1 diagrama de Ishikawa.

Para la conducción del fluido geotérmico se debe proponer un diagrama de Ishikawa que sea representativo del problema. En su elaboración se toman en cuenta todos aquellos factores que intervienen en el mismo y se colocan por orden de importancia en las columnas del diagrama, posteriormente se consideran los factores de menor importancia que tienen influencia sobre los ya considerados y se ubican en los ramales de menor rango [22].

En base a los puntos que se conocen del problema y con un criterio personal se elabora el diagrama de Ishikawa mostrado en la figura 3.3.

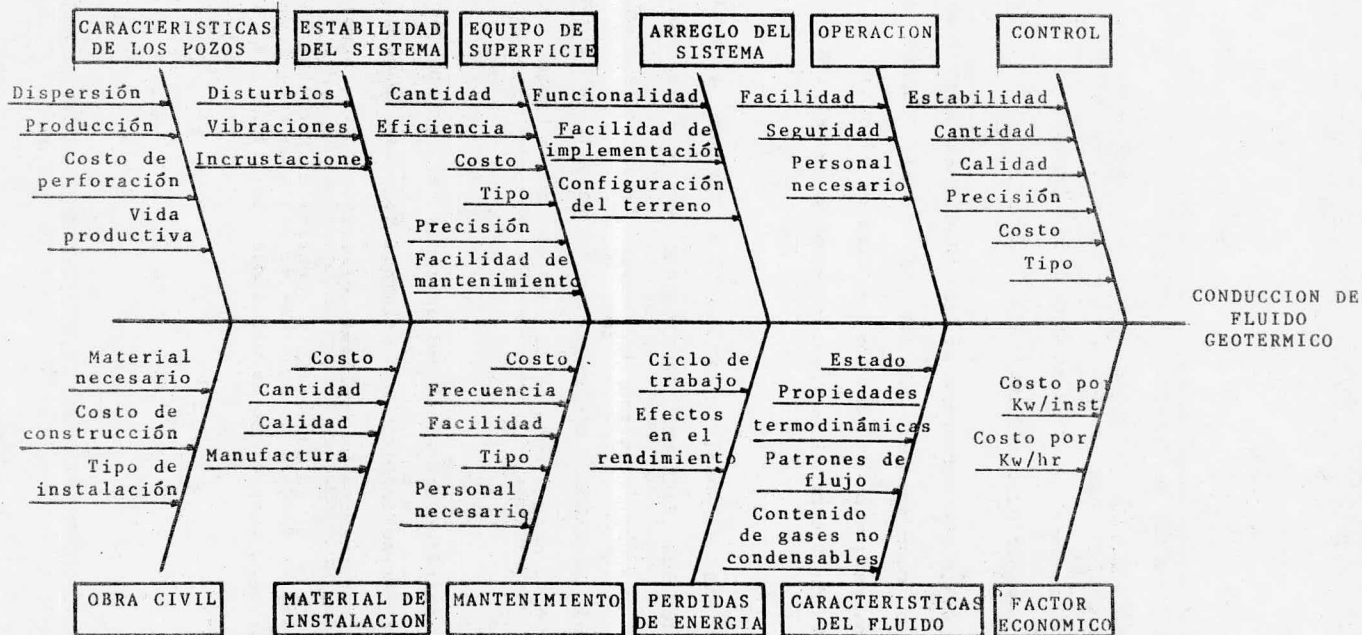


Fig. 3.3 DIAGRAMA DE ISHIKAWA

III.2.2 Diagrama de Pareto.

Como paso siguiente se aplica el principio de Pareto, que es una técnica que separa los problemas más importantes de los triviales y cuyo principio dice [22]

"Invirtiendo mis esfuerzos en los problemas más fuertes que pudieran corresponder al 20% del total, tendré como resultado una reducción del 80% de los mismos; o lo que es lo mismo el 80% de los problemas son provocados por el 20% de las causas".

Para iniciar el análisis por Pareto se procede a evaluar cada uno de los factores mencionados en el diagrama de Ishikawa. A los que resulten de mayor importancia, en la solución del problema, se les asigna un porcentaje (%) hasta obtener el 100%, dependiendo de la influencia que tenga en el problema.

Los porcentajes obtenidos del análisis se introducen en una gráfica arreglandolos en columnas de orden descendente. Cada columna representa un problema diferente. La mayor de ellas se sitúa a la izquierda y contiene el problema que se resolverá primero puesto que es ahí donde se tiene la mayor pérdida [22]

Los diagramas de Pareto obtenidos de acuerdo al criterio del capítulo III.3.2 para la conducción por medio de colectores y por líneas independientes se muestran en las figuras 3.4 y 3.5 respectivamente.

Para los colectores se observa que los parámetros de mayor importancia son:

A.- Arreglo del sistema	20%
B.- Inversión inicial	18%
C.- Operación	15%
D.- Estabilidad del sistema	10%
E.- Sistema de control	10%
F.- Mantenimiento	7%
G.- Características del fluido...	5%
H.- Otros	15%

Asimismo para la conducción por medio de líneas independientes se tiene:

A.- Operación	20%
B.- Inversión inicial	20%
C.- Incrustaciones	15%
D.- Equipo	15%
E.- Mantenimiento	10%
F.- Desecho de la salmuera ..	5%
G.- Otros	15%

COLECTORES:

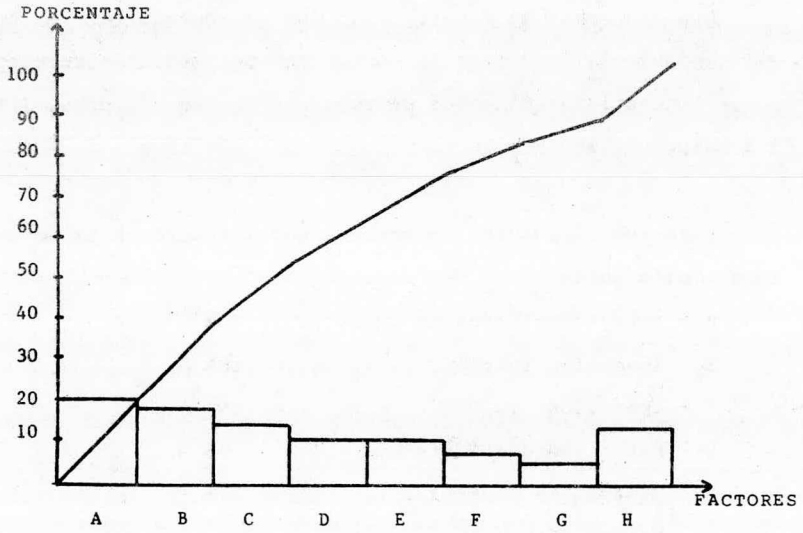


Fig. 3.4 Diagrama de Pareto para colectores.

LINEAS INDEPENDIENTES:

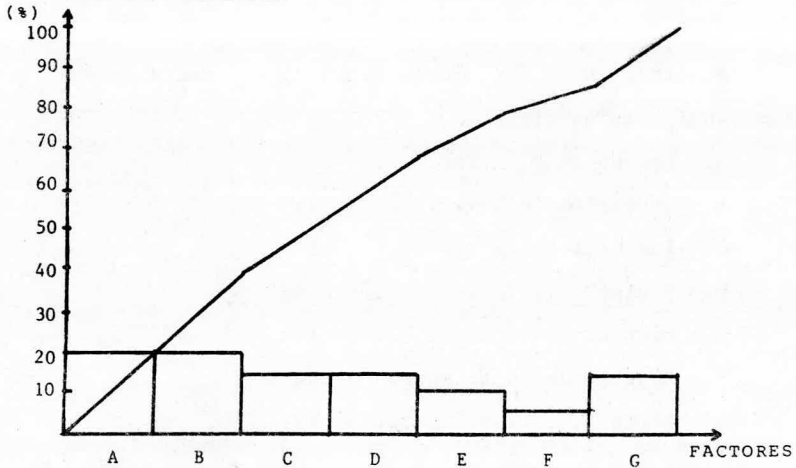


Fig. 3.5 Diagrama de Pareto para líneas independientes.

Con los factores que intervienen en Pareto se pueden establecer las bases de comparación de manera general para ambas alternativas.

III.3 BASES DE COMPARACION.

Los principales factores a considerar para el estudio del problema se resumen en 4 puntos importantes.

- a) Problemas técnicos.
- b) Material y equipo.
- c) Obra Civil y Mantenimiento.
- d) Evaluación económica.

III.3.1 PROBLEMAS TECNICOS.

III.3.1.1 Arreglo del sistema

COLECTORES: Para el análisis se requieren dos tipos de arreglos; uno de conducción de vapor, que no es difícil de determinar dado el comportamiento del mismo; y otro de conducción de mezcla, que resulta difícil de diseñar considerando los problemas presentados en el capítulo I.

El problema se enfoca principalmente a los colectores de mezcla para tratar de predecir el comportamiento del fluido bifásico al mezclarse.

LINEAS INDEPENDIENTES

Aún cuando su uso es común su aplicación tienen algunas desventajas, tales como son:

- a) El alto porcentaje de incrustaciones en los equipos y líneas de conducción de agua separada.
- b) La dificultad para conducir el agua de desecho, hasta la laguna de evaporación.

Aunque por otro lado tiene la ventaja de que la conducción del fluido geotérmico no presenta graves problemas ya que el separador se encuentra colocado a la salida del pozo y por consiguiente la línea de conducción no es de gran longitud.

Con lo anterior se hace notar que ambas alternativas ofrecen tanto ventajas como desventajas, por lo que el análisis a efectuar deberá reflejar cual alternativa presenta menos pérdidas, tanto técnicas como económicas

III.3.1.2 Características de los pozos.

Para el análisis se considera que todos los pozos tienen características diferentes, como son: presión, flujo, contenido de sólidos y gases, entre otros. De manera general el comportamiento de estos factores es el siguiente:

-Presión y flujo en la cabeza del pozo:

Al perforar los pozos geotérmicos, se hace contacto con mantos de agua que muestran una presión máxima o igual a la de una columna hidrostática de altura similar a la profundidad del pozo. Conforme el agua caliente del acuífero va ascendiendo por el pozo se va depresurizando y convirtiéndose parcialmente en vapor. Si la temperatura y presión del yacimiento son lo suficientemente elevadas se establece un flujo continuo de una mezcla agua-vapor el cual va a depender de las condiciones de trabajo existentes en la cabeza del pozo [7].

Estudios realizados han aportado resultados del comportamiento de la presión en la cabeza del pozo en función del flujo. La gráfica (3.5) muestra un comportamiento típico o curva característica de la producción de un pozo.

Existe una relación inversa entre la presión y el flujo, cuando el flujo aumenta la presión disminuye o viceversa.

El fenómeno se explica de la siguiente manera: en la cabeza del pozo existen válvulas por medio de las cuales se controla la presión, cuando es muy grande se genera también una oposición grande dentro de la tubería que conduce el fluido geotérmico, provocando que el gasto disminuya debido a la presión que debe vencer, esto trae como consecuencia que la cantidad de mezcla agua-vapor sea pequeña en la salida del pozo. Por el contrario si la presión es mínima el fluido geotérmico circula libremente hacia la superficie en cantidades mayores de mezcla.

El conocimiento del fenómeno anterior es importante para suministrar la cantidad adecuada de vapor requerido en el sistema.

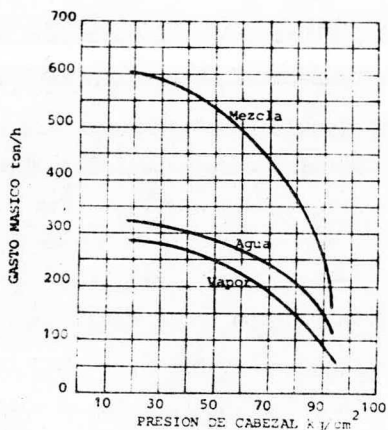


Fig. 3.5 Curvas características de producción de un pozo.

III.3.1.3 Sistema de Control

El término de sistema de control se usa para designar algún proceso, el cual está sujeto a varios estímulos en forma de disturbios o cargas que provocan una respuesta.

Para el problema de conducción de mezcla bifásica el control se aboca a evitar las sobrepresiones en el sistema, o por el contrario a evitar las caídas de presión bruscas.

Por lo tanto las variables a controlar son la presión y el flujo, aunque con modificar una cambia directamente la otra (siempre que no se esté en estado de flujo crítico).

Para el caso particular de los colectores el control de presión va a ser en base a tres condiciones de trabajo diferentes:

- 1) Instalación de elementos de protección con capacidad suficiente para manejar solo la mezcla producto de su respectivo pozo.
- 2) Instalación de arreglos de válvulas para regulación de la mezcla total que se colecta.
- 3) Implementación de un sistema de regulación y protección para manejar el 100% del flujo de vapor que alimenta a la turbina.

Con el control se desea prever cualquier situación en la funcionalidad y seguridad del sistema; sin embargo se requiere de un sistema que no resulte muy costoso y que a su vez asegure un funcionamiento eficiente de la planta.

En el estudio no será válido seleccionar un control que fuera económicamente atractivo pero que en la práctica presentara disturbios e inestabilidades.

III.3.2 Material y equipo.

Equipo: los equipos más importantes a considerar son los separadores y los secadores.

Material: en éste punto se incluye la tubería necesaria, la cual es previamente dimensionada de acuerdo a las condiciones de trabajo establecidas.

III.3.3 Obra Civil y Mantenimiento.

Obra Civil: incluye material y personal requerido para la construcción, así como la estimación a trabajos a realizar en cada alternativa, como son por ejemplo la construcción de apoyos para tuberías, brechas, etc.

Mantenimiento: se pretende determinar la frecuencia con que se debe realizar en cada equipo, el tipo de mantenimiento a efectuar ya sea preventivo o correctivo. Así como el número de personas necesario para realizarlo.

III.3.4 Evaluación económica.

En los casos que sea posible se hace una estimación de costos, utilizando el criterio de valor presente y tomando como referencia los precios del 10 de diciembre de 1986. (1 U.S = \$ 815 M.N.)

Finalmente cabe decir que el análisis técnico se hace de manera independiente del factor económico y que solo al concluir el estudio se conjuntan ambos parámetros y se determina cual alternativa ofrece mayores ventajas.

CAPITULO IV

ANALISIS DE ALTERNATIVAS

Se analizan tres alternativas, siendo la finalidad de cada una de ellas la de conducir, ya sea mezcla o vapor, desde la cabeza del pozo hasta la casa de máquinas.

A priori no es posible definir las condiciones de trabajo que puedan ser utilizadas como base de comparación, debido a que se van a emplear criterios diferentes para la solución de los problemas de cada alternativa, sin embargo, esto no significa que se utilicen valores arbitrarios, sino que a medida que se avance en el desarrollo se podrán definir los parámetros que se utilicen de referencia para poder comparar posteriormente las alternativas.

Cabe aclarar que siendo tres las alternativas, únicamente existen dos métodos de conducción: la conducción por medio de líneas independientes y la conducción por medio de colectores. Para los colectores se utilizan dos arreglos con diferentes características de operación, lo que implica tener como dos primeras alternativas el análisis de colectores y como tercera las líneas independientes.

Por esta razón las alternativas A y B se analizan de manera simultánea, ya que se aplican criterios que son válidos para ambas, cuando no sea posible hacerlo, cada una se analiza por separado.

IV.1 CRITERIOS PARA EL ANALISIS DE COLECTORES.

El término Colector se maneja como el arreglo de tuberías por medio del cual se combinan o mezclan, flujos provenientes de diferentes pozos, en un punto de confluencia. La utilización de colectores para fines de conducción de fluido geotérmico, es aún poco conocido, por lo que existen parámetros que todavía no han podido ser evaluados, trayendo como consecuencia que el estudio no resulte tan completo como se quisiera, siendo necesario considerar estados ideales y condiciones de flujo homogéneo.

El inicio del análisis es la selección de los arreglos que satisfagan las condiciones del objetivo propuesto, que para éste caso es el de conducir fluido geotérmico por medio de un sistema de colectores.

IV.1.1 CRITERIOS PARA LA SELECCION DEL ARREGLO.

Con base en la información obtenida de las condiciones de trabajo y ubicación geográfica de los pozos de Cerro Prieto II, se elaboraron diversos arreglos, de los cuales se seleccionaron únicamente 2 bajo las siguientes consideraciones:

- 1.- Arreglos simples y de menor longitud de tubería.
- 2.- Facilidad de implementación.
- 3.- Arreglos con ángulos de unión de 45' en las confluencias.
- 4.- Proximidad de los separadores a la casa de máquinas.
- 5.- Número y capacidad de los separadores.
- 6.- Cercanía de los separadores entre sí, para coleccionar posteriormente el vapor.
- 7.- Características termodinámicas del fluido geotérmico.
- 8.- Localización de los pozos.
- 9.- Número de pozos existentes en cada ramal colector.
- 10.- Aprovechamiento de los canales de riego para transportar el agua de desecho.
- 11.- Pérdidas de energía mínimas.

IV.1.2 ALTERNATIVAS A y B:

Como resultado de la aplicación de los criterios antes mencionados se obtienen los arreglos de las figuras 4.1 y 4.2 que corresponden a la alternativa A y B respectivamente.

ALTERNATIVA A:

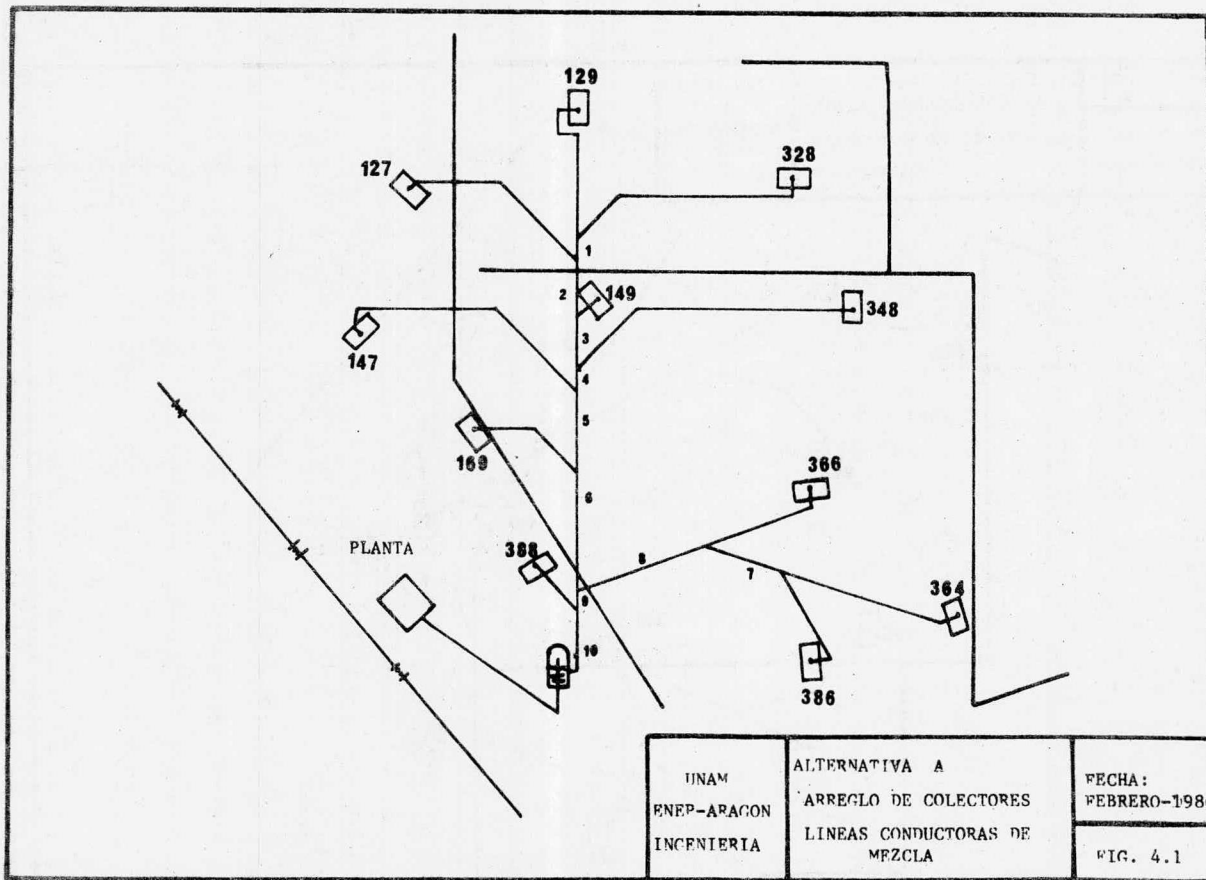
La mezcla en dos fases se colecta en un ramal único y el agua separada se conduce a través de una sola línea.

ALTERNATIVA B:

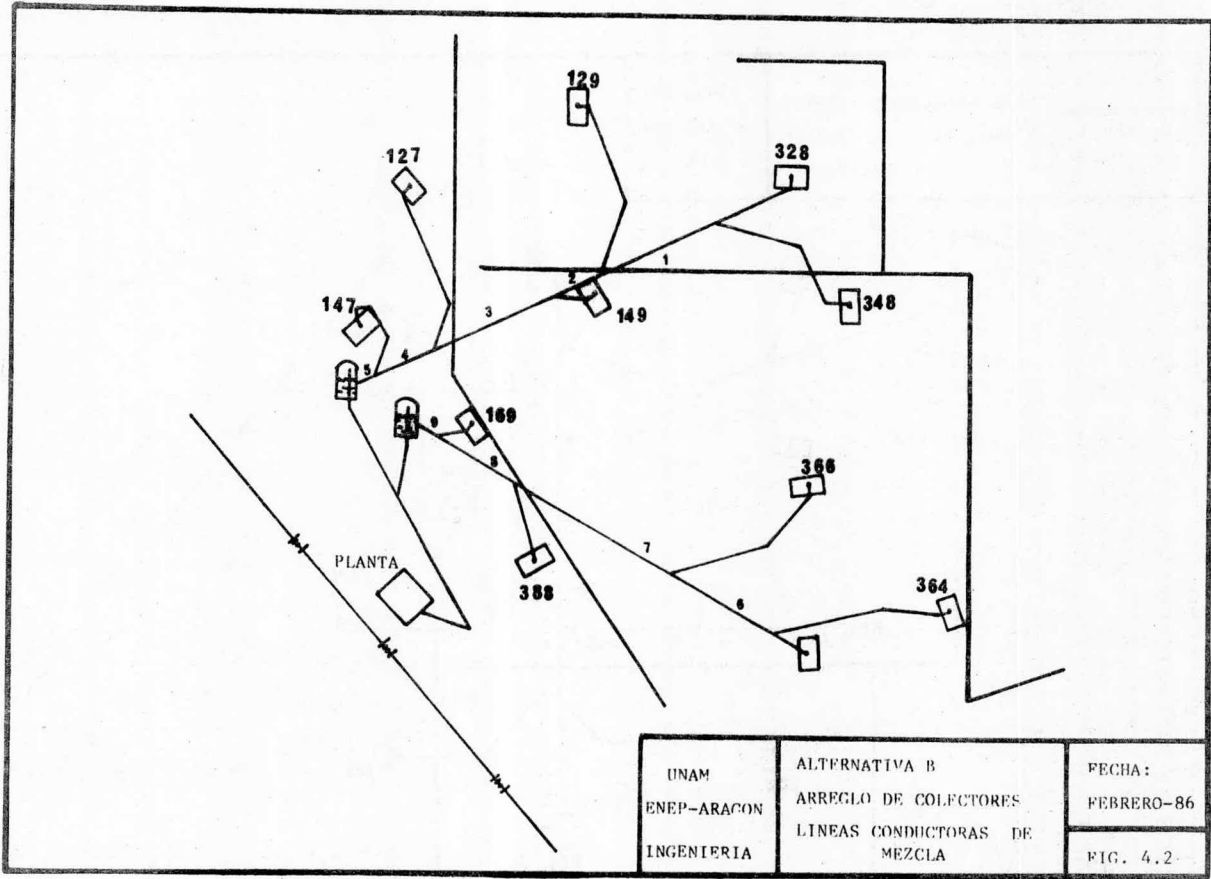
Existen dos ramales para colectar la mezcla bifásica, colectándose posteriormente también el vapor y el agua de desecho si es necesario.

Una vez que se ha definido el arreglo, se identifican los elementos que lo integran (equipos); y asimismo se analiza la información obtenida de las condiciones de operación (anexo 1), de la Central Geotérmica de Cerro Prieto II, para definir que valores se pueden utilizar en el dimensionamiento del nuevo arreglo.

La información que se obtuvo resulto muy escasa por lo que surgieron problemas para definir la secuencia de análisis, presentándose básicamente las dos siguientes posibilidades:



UNAM ENEP-ARAGON INGENIERIA	ALTERNATIVA A ARREGLO DE COLECTORES LINEAS CONDUCTORAS DE MEZCLA	FECHA: FEBRERO-1986
		FIG. 4.1



UNAM ENEP-ARACON INGENIERIA	ALTERNATIVA B ARREGLO DE COLECTORES LINEAS CONDUCTORAS DE MEZCLA	FECHA: FEBRERO-86
		FIG. 4.2

1.- Tomando como base las condiciones de operación de los pozos.

Se conoce la presión del fluido en el cabezal del pozo (antes de pasar por el árbol de válvulas), para dimensionar las líneas se debía suponer una pérdida de presión provocada por las válvulas y la placa de orificio que se encuentran en la cabeza del pozo. La presión resultante se considera que es la presión de entrada de las líneas de conducción de mezcla, por consiguiente la que define el inicio del análisis. Esta opción presento dos inconvenientes:

a) La presión de entrada no es la real, ya que no se encontró información de las pérdidas de presión que comúnmente existen en el árbol de válvulas y la placa de orificio, lo que significa que la presión de entrada a las líneas de mezcla en realidad se supone.

b) Como consecuencia del punto anterior, se desconoce la cantidad de vapor que se produce a la presión establecida. Si es considerable la diferencia entre el vapor generado y el que se requiere para alimentar los equipos, esto implica un nuevo diseño de los mismos.

2.- Considerando las condiciones de diseño de la turbina.

Se conoce la presión a la entrada de la turbina y el flujo de vapor necesario para generar 110 MW, con éstos valores se inician los cálculos de la turbina hacia atrás.

Primero se determinan las caídas de presión, para evaluar la presión en el separador, que a su vez corresponde a la presión de salida del colector de mezcla (observar la figura 4.3). Posteriormente se determinan las pérdidas de presión de las líneas de mezcla y por último se obtiene la presión de operación a la salida de los pozos, la que en el punto 1 se suponía.

El problema que se presenta para ésta consideración es que el programa de cómputo utilizado para el cálculo de las caídas de presión de la mezcla bifásica, se ejecuta con base en las condiciones de entrada del tramo analizado y no a las de salida que para este caso son las que se conocen. Evidentemente esto trae como consecuencia el empleo de un método iterativo, ya que se proponen presiones de entrada, se calcula la pérdida de presión y se revisa en cada corrida que la presión de salida sea muy parecida o igual a la que se conoce.

Aún cuando el método resulta laborioso es el que se emplea actualmente para el dimensionamiento del arreglo de colectores. Con ésta opción se tiene además la ventaja de poder utilizar la turbina existente.

En las figuras 4.3 y 4.4 se muestran los arreglos simplificados de las alternativas A y B, se observan los equipos y líneas conductoras de mezcla bifásica y vapor.

Para efectuar el análisis de los colectores de mezcla bifásica se utilizan algunos planteamientos válidos para las dos primeras alternativas. Cuando no es posible hacerlo ,debido a las diferencias propias de cada arreglo, se da la explicación de manera separada para cada una de ellas.

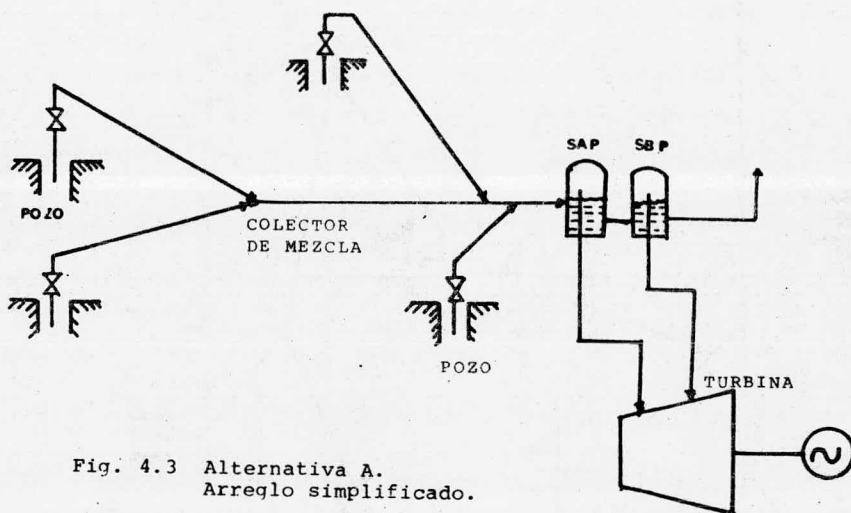


Fig. 4.3 Alternativa A.
Arreglo simplificado.

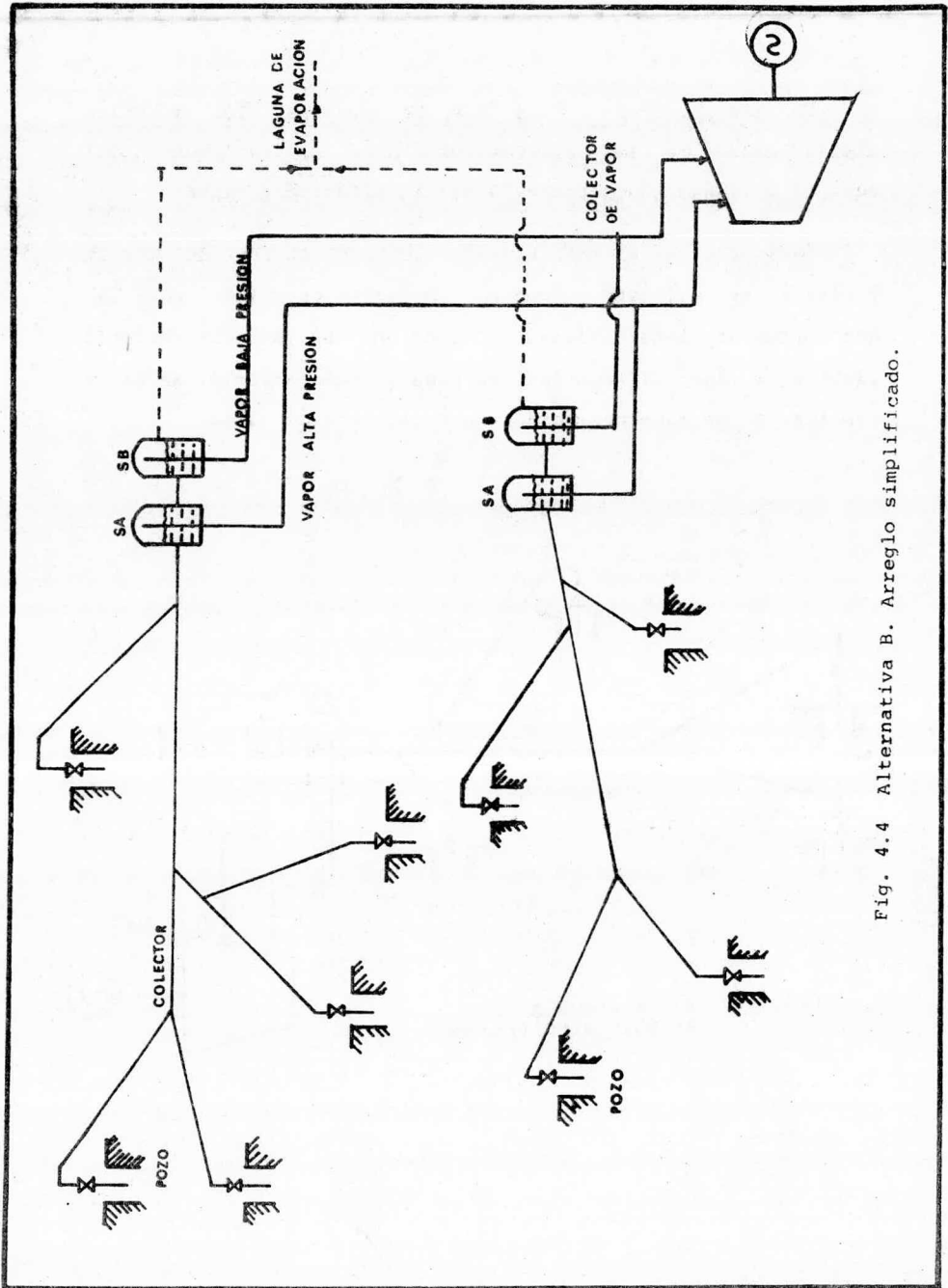


Fig. 4.4 Alternativa B. Arreglo simplificado.

IV.1.3 GENERALIDADES SOBRE EL ANALISIS TERMODINAMICO DE LOS COLECTORES

IV.1.3.1 Dimensionamiento de las líneas conductoras de vapor y separadores.

ALTERNATIVA A:

De acuerdo con la figura 4.5 el análisis se inicia de la turbina hacia atrás, razón por la cual se deben determinar primero las características de los tramos 1-2 y 1'-2', que corresponden a las líneas de vapor de alta y baja presión, las que alimentan la turbina.

Las condiciones de trabajo para la turbina de presión mixta son:

Presión alta a la entrada = 11.3 bar abs.

Presión baja a la entrada = 3.5 bar

Flujo de vapor = 750 000 kg/h

Con base en la presión de la turbina, la que debe tener el vapor a la entrada de esta, se determinan los diámetros de los vaporductos (Anexo 2-B), posteriormente se calculan las

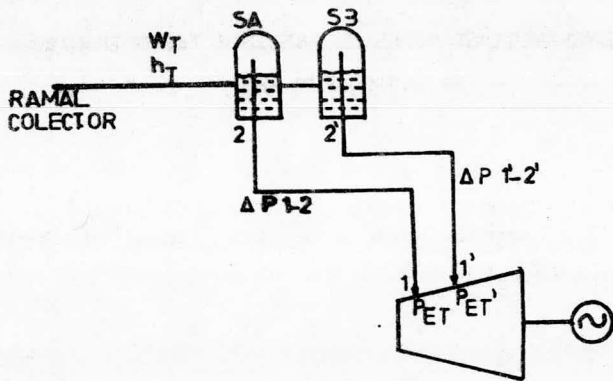


Fig. 4.5 Arreglo de la alternativa A

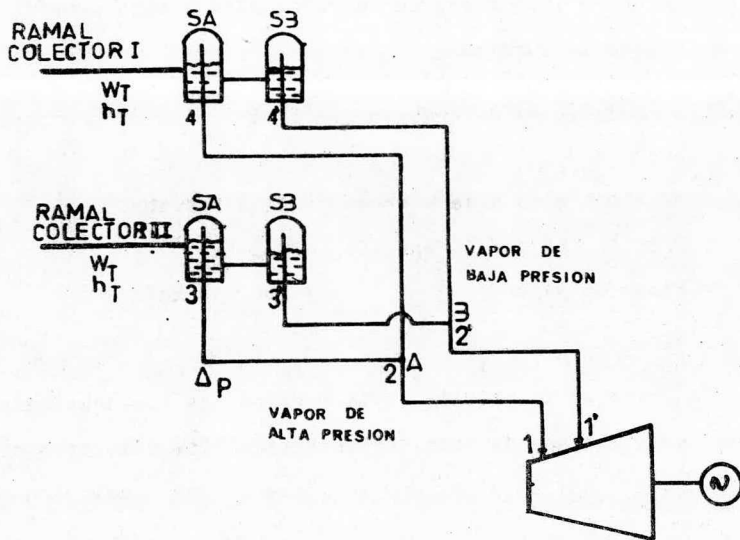


Fig. 4.6 Arreglo de la alternativa B

pérdidas de presión en las líneas de vapor (Anexo 2-A).

Con estos valores se determina la presión de los separadores de alta y baja presión de la siguiente manera:

$$P_{SA} = P_{ETA} + \Delta P_{1-2}$$

$$P_{SB} = P_{ETB} + \Delta P_{1'-2'}$$

ALTERNATIVA B:

De manera similar a la alternativa anterior se determinan las características de los tramos 1-2 y 1'-2'.

En este caso se tienen dos colectores, por lo que se debe determinar primero la presión en A (línea de alta) y la presión en B (línea de baja). Ver figura 4.6

$$P_A = P_{ET} + \Delta P_{1-2}$$

$$P_B = P_{ET} + \Delta P_{1'-2'}$$

P_A corresponde a la presión de salida de la línea de alta presión de ambos colectores y a su vez P_B corresponde a la línea de baja presión. La explicación anterior no significa que:

$$P_4 = P_3 \quad \text{y} \quad P_{4'} = P_{3'}$$

Va que los separadores no están ubicados a la misma distancia de la planta, lo que significa que sus pérdidas de presión son diferentes, por lo tanto para la presión de separación del colector I se tiene:

$$P_{SAP} = P_A + \Delta P_{4-2}$$

$$P_{SBP} = P_B + \Delta P_{4'-2'}$$

Para el colector II se tiene:

$$P_{SAP} = P_A + \Delta P_{2-3}$$

$$P_{SBP} = P_B + \Delta P_{2'-3'}$$

Para continuar el análisis es preciso determinar previamente la cantidad de mezcla que llega a los separadores y de ahí dimensionarlos.

Por lo que para conocer el flujo total (W_T) que existe a la entrada de los separadores, así como su entalpía (H_T); se realiza un balance de masa y energía. El cálculo se inicia del pozo más alejado del separador hasta la entrada del mismo y aprovechando que se conoce tanto el flujo como la entalpía de cada uno de los pozos (Anexo 1), el análisis se efectúa de la siguiente manera: (ver figura 4.7)

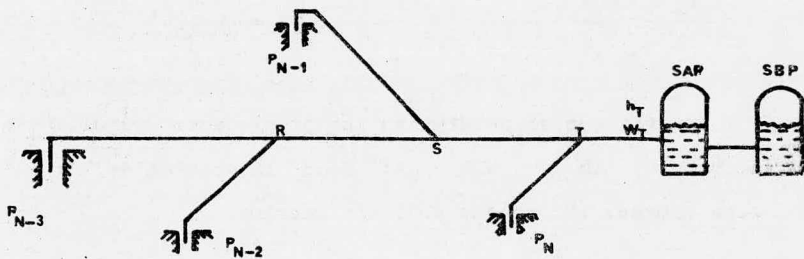


Fig. 4.7 Ramal colector.

Propiedades resultantes en el tramo R:

$$W_R = W_{N-2} + W_{N-3} \qquad h_R = \frac{W_{N-2} h_{N-2} + W_{N-3} h_{N-3}}{W_R}$$

Considerando además un proceso isoentálpico, para el tramo S se tiene:

$$W_S = W_{N-2} + W_{N-1} + W_{N-3} \qquad h_S = \frac{W_{N-1} h_{N-1} + W_R h_R}{W_S}$$

y las propiedades de la mezcla resultante son:

$$W_T = W_{N-3} + W_{N-2} + W_{N-1} + W_N$$

$$h_T = \frac{W_N h_N + W_S h_S}{W_T}$$

de manera general se tiene:

$$W_T = \sum_{i=1}^n W_i \qquad h_T = \frac{\sum_{i=1}^n W_i h_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Una vez que se determinan las propiedades resultantes de la mezcla (W_T , H_T) así como la presión de los equipos (separadores), se procede a dimensionarlos.

IV.1.3.2 EQUIPOS.

SEPARADORES:

Para su diseño termodinámico los principales parámetros que se deben considerar son [2]:

- 1) La relación entre la cantidad de vapor y líquido a ser separado.
- 2) El diámetro de gota es un parámetro sumamente importante ya que determina la eficiencia de separación.
- 3) La velocidad del vapor en la entrada del equipo puede caracterizar el comportamiento del mismo. A velocidades bajas la separación es mala.

Además la presión de diseño de los separadores se hace en base a los siguientes criterios:

- a) La presión debe asegurar que el vapor llegue a la turbina con las condiciones de trabajo requeridas

por la misma.

- b) En base al contenido de sílice se debe determinar la presión adecuada, ya que por abajo de dicha presión las incrustaciones son considerables, lo que implica que el mantenimiento sea más frecuente reduciendo con ello la disponibilidad del equipo.

Considerando los criterios anteriores se procede a efectuar un balance de energía en los separadores, el cual proporciona datos de las propiedades termodinámicas del vapor y del agua separada, obtenidos después de la separación (Ver anexo 2-C).

Posteriormente se procede a dimensionar los separadores (Anexo 2-D), en base a los parámetros que hasta esta parte se han definido (W_T , H_T , P_{SA} , P_{SB}).

En este punto del análisis es importante comprobar que la cantidad de vapor que se obtiene del separador, el cual está en función de la presión de separación y de la cantidad de mezcla total, sea mayor o por lo menos igual a la que necesita la turbina para generar 110 MW.

En base a las consideraciones mencionadas se calculan los arreglos de líneas de vapor y equipos que satisfacen las condiciones de operación de la Central Geotérmica de Cerro Prieto II, correspondientes a las alternativas A y B. (Ver anexo 3)

IV.1.3.3 DIMENSIONAMIENTO DE LINEAS CONDUCTORAS DE MEZCLA.

Una vez que se han dimensionado los equipos y las líneas conductoras de vapor se procede a dimensionar las líneas conductoras de mezcla de los colectores, las cuales tienen la función de transportar la mezcla obtenida de los pozos hasta el separador (no se debe perder de vista que el análisis se va generando de la entrada de la turbina hacia atrás), es por esta razón que el dato para iniciar el análisis es el que corresponde a la presión del separador, esto es aplicable considerando que es la presión mínima con que debe llegar la mezcla colectada al mismo.

Por consiguiente para determinar el diámetro de las líneas de mezcla, además de la presión del separador de alta presión se toma en cuenta el comportamiento de la mezcla en dos fases al ser conducida (Anexo 4).

Para la obtención de los diámetros se necesita conocer primeramente la velocidad superficial del líquido y del vapor:

$$V_{SL} = \frac{Q_L}{A} = \frac{(1-X) W_T v_L}{A_L}$$

$$V_{SV} = \frac{Q_V}{A} = \frac{X W_T v_V}{A_V}$$

De acuerdo a las velocidades recomendadas por Crane, para el líquido y el vapor se tiene:

$$30 = \frac{X W_T v_V}{A_V} \quad \text{Vel. superficial del vapor.}$$

$$3 = \frac{(1-X) W_T v_L}{A_L} \quad \text{Vel. superficial del liq.}$$

De las dos últimas ecuaciones se despeja el área que ocupa el líquido (A_L) y el vapor (A_V).

El área total es la suma de ambas:

$$A_T = A_L + A_V$$

Conociendo A_T se determina el diámetro interior de las líneas conductoras de mezcla bifásica:

$$D_i = \frac{4 A_T}{\pi}$$

Cabe aclarar que para desarrollar el dimensionamiento de las líneas se supuso inicialmente una caída de presión de 0.2 bar por cada 100 metros de longitud, estos valores se utilizaron como un valor inicial en el cálculo iterativo, para la determinación de la presión de entrada de cada tramo analizado y a la vez para poder evaluar con dicha presión las propiedades termodinámicas de la mezcla (calidad, entalpia, densidad) que son necesarias para el dimensionamiento de las líneas.

Es importante aclarar también que en el análisis no se incluye el pozo de respaldo, por lo que el dimensionamiento de las líneas es en base al flujo correspondiente a diez pozos (necesarios para generar 110 MW).

El criterio para seleccionar que pozo será excluido del análisis, es el de eliminar aquel que este más próximo al separador para asegurar que las tuberías del ramal principal tengan capacidad suficiente para conducir la mezcla, independientemente del pozo que quede de respaldo.

IV.1.3.4 PERDIDAS DE PRESION EN FLUJO BIFASICO.

Con los datos de diámetros y longitudes de cada tramo se procede a calcular las pérdidas de presión reales que se generan en el sistema.

El análisis no resulta sencillo considerando que se trabaja con flujo en dos fases, por esta razón el cálculo se realiza con ayuda de un programa de cómputo, utilizando el método de DUKLER II para la determinación de las pérdidas de presión (Anexo 5).

En la conducción de flujo en dos fases es importante el control de las caídas de presión para evitar la presencia del flujo crítico en las tuberías lo que provocaría vibraciones e inestabilidades.

Por esta razón en el análisis de las líneas conductoras de mezcla es más válido tomar como parámetros de referencia las caídas de presión que las velocidades recomendadas.

El programa de cómputo utilizado en el análisis requiere de los siguientes datos de entrada:

Presión absoluta a la entrada de la línea.

Diámetro interno

Rugosidad absoluta

Flujo másico

Entalpía del flujo

Longitud del tramo analizado.

Y a su vez proporciona los valores de pérdidas de presión y patrón de flujo existente en el tramo analizado.

La forma de utilizar el programa es la siguiente:

Con la presión de entrada (obtenida del criterio de considerar una pérdida de 0.2 bar por cada 100 metros) se inicia la primer corrida que corresponde al tramo de tubería que llega al separador y se verifica que la presión de entrada menos las pérdidas (obtenidas del programa) sea igual o muy parecida a la de salida, que es la que en realidad se conoce (presión del separador). Este proceso iterativo se aplica a todo el ramal colector, hasta obtener finalmente la presión del pozo más alejado.

IV.1.3.5 ANALISIS DE LAS CONFLUENCIAS

Durante el presente estudio se ha observado la complejidad que representa predecir el comportamiento de la mezcla bifásica, resultando aún más difícil cuando se combinan mezclas con propiedades termodinámicas diferentes, situación que se presenta en las confluencias de los arreglos.

Con el fin de conocer el comportamiento de las mismas y para facilitar el análisis se emplea el Método Homógeno (Anexo 6), que por otra parte es el más apropiado en este caso, puesto que al mezclarse ambos fluidos lo hacen de una forma caótica.

Una vez que se define la mezcla como un fluido homogéneo se procede a evaluar las propiedades termodinámicas de la mezcla resultante (correspondientes al tramo R de la figura 4.8)

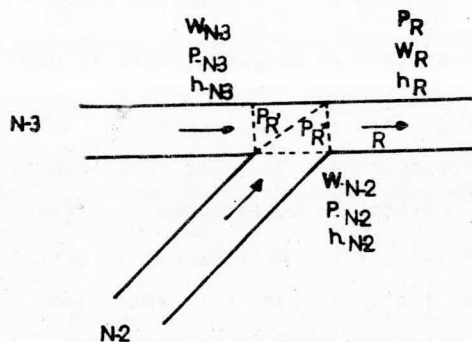


Fig. 4.8 Confluencias.

Primeramente se analiza la presión, para lo cual se tiene el siguiente desarrollo (+):

La pérdida de presión del tramo (n-3) al punto R es:

$$\Delta P_{N-3,R} = K_{N-3,R}^* \frac{G_T^2}{2 \rho_H}$$

Por lo tanto la presión en el tramo R considerando las pérdidas de la línea principal es:

$$P'_R = P_{N-3} - \Delta P_{N-3,R}$$

De igual manera del tramo (n-2) hasta R se tiene

$$\Delta P_{N-2,R} = K_{N-2,R}^* \frac{G_T^2}{2 \rho_H}$$

La presión en R debido a las pérdidas de presión del tramo que converge es:

$$P''_R = P_{N-2} - \Delta P_{N-2,R}$$

Por último para obtener la presión resultante, que está en función de las líneas que convergen se tiene:

$$P_R = \frac{P'_R + P''_R}{2}$$

Esta consideración es válida teniendo en cuenta que se utiliza el método homogéneo.

(+): La relación con que se obtiene la presión resultante únicamente es válida cuando la presión de las líneas que convergen son semejantes.

(*): Por las limitantes que existen para conocer el coeficiente de fricción K para flujo bifásico, dicho coeficiente se obtiene de gráficas propuestas por Mataix. Teniendo presente que los valores obtenidos no son plenamente aplicables a la solución, puesto que son hechos para confluencias que manejan flujo en una sola fase (Ver anexo 7).

Por otra parte la entalpia y el flujo resultante de las confluencias se obtiene efectuando un balance de masa y energia, como el mostrado en la parte IV.1.3.1 de este capitulo.

El flujo se calcula de la siguiente manera:

$$W_R = W_{N-2} + W_{N-3}$$

Y la entalpia:

$$h_R = \frac{W_{N-2} h_{N-2} + W_{N-3} h_{N-3}}{W_R}$$

La calidad se determina partiendo de la definici3n de entalpia:

$$h_R = X_R h_V + h_L (1-X)$$

h_V se obtiene en tablas termodinamicas

h_L con la presi3n resultante (P_R)

despejando la calidad:

$$X_R = \frac{h_R - h_L}{h_V - h_L}$$

El analisis de las confluencias permite determinar las propiedades de la mezcla resultante, asi como efectuar un estudio m3s completo, ya que al obtener las p3rdidas de presi3n que se generan en las confluencias y sumarlas (o restarlas dependiendo del valor de K), a las que se obtienen del

programa, se determinan las pérdidas de presión reales del tramo analizado.

En el desarrollo del presente trabajo se han definido los arreglos de los colectores, dimensionandose las líneas de vapor y de mezcla, así como los separadores. También se han determinado las propiedades termodinámicas de los fluidos que se manejan.

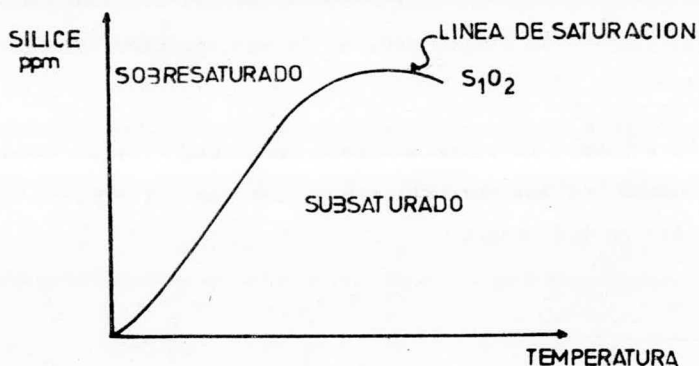
Lo anterior significa que se ha llegado a un arreglo final del cual se conocen los parámetros mas importantes para su análisis, ahora es necesario considerar aquellos factores que son determinantes en el funcionamiento del sistema , así como preveer ciertos fenómenos propios de la conducción del flujo en dos fases.

Para los colectores se consideran los problemas ocasionados por las incrustaciones, así como el tipo de control a emplear en los mismos.

IV.1.4 INCRUSTACIONES.

El contenido de sólidos en la mezcla bifásica es un factor importante a considerar para utilizar colectores. Su análisis se enfoca principalmente al control del depósito de sílice en las líneas para prolongar la vida de las mismas, ya que aún cuando la salmuera geotérmica contiene diferentes sólidos el compuesto de mayor carácter incrustante es la sílice. De ahí que la curva de saturación de la Sílice-Temperatura sea un elemento de gran utilidad para determinar el comportamiento del fenómeno, así como la gravedad del mismo.

En la siguiente figura se observa el diagrama mencionado:

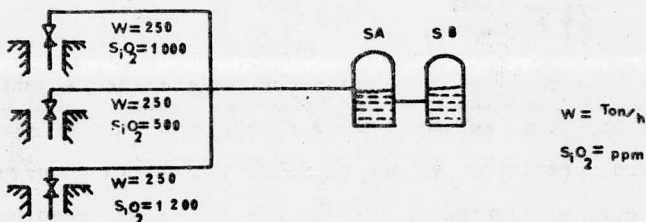


Se entra al diagrama con la temperatura de saturación que corresponde a la presión en la cabeza del pozo. La curva de solubilidad delimita la zona en que se encuentra la sílice en estado de solución, esto significa que es la mayor cantidad de

silice que puede existir en la mezcla sin provocar problemas, ya que la silice en ese estado no se precipita. La silice que se encuentra en la zona superior de la curva de saturación se conoce como silice en estado de suspensión y es la que al descender la temperatura de saturación en la mezcla se precipita y forma las incrustaciones que disminuyen el diámetro de paso del fluido.

En los colectores se presenta una situación con respecto a las incrustaciones que ofrece ventajas si se selecciona un arreglo adecuado en función de las propiedades termodinámicas de los fluidos de cada pozo y es la siguiente:

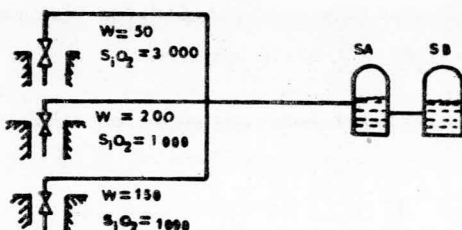
Supongase un arreglo con las siguientes condiciones:



Con la presión de cabeza de pozo se determina la silice en estado de solución de los pozos (de acuerdo al anexo 8 se tiene un promedio de 820 ppm), por lo tanto de acuerdo a la figura antes mostrada se tiene que en primer pozo existen 180 ppm de silice en suspensión, el segundo se encuentra en la zona de subsaturación y el tercero cuenta con 380 ppm en estado de suspensión.

Al mezclarse los flujos de los dos primeros pozos el promedio de sílice obtenido en la mezcla es de 750 ppm, logrando con esto que en la línea colectora no halla sílice en suspensión. Al mezclarse el tercer pozo provoca una concentración en el ramal colector de 900 ppm, reduciéndose de nuevo la cantidad de sílice en estado de suspensión (que en un principio fué de 380 para el tercer pozo).

Para el nuevo arreglo:



En este caso los tres pozos contienen sílice en estado de suspensión, sin embargo no es conveniente mezclar el primero con los dos restantes ya que el flujo que aporta es pequeño en tanto que el contenido de sílice es alto, resultando más conveniente manejar el flujo del primer pozo de manera independiente.

Para la central Geotérmica de Cerro Prieto II no fué posible obtener la información necesaria para efectuar el análisis de incrustaciones de la manera antes mencionada, por lo que los arreglos se elaboran de manera independiente del contenido de sílice existente en cada pozo.

IV.1.5 SISTEMA DE CONTROL.

IV.1.5.1 Control en los pozos.

El control se establece con un sistema como el mostrado en la figura 4.9.

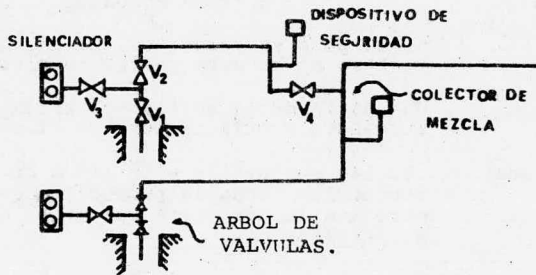


Fig. 4.9 Control en los pozos.

El pozo cuenta con un árbol de válvulas formado por tres válvulas de compuerta (V_1 , V_2 , V_3) [14].

Válvula V_1 : se conoce como válvula maestra, comunica o aísla totalmente el pozo de las tuberías de conducción.

Válvula V_2 : válvula de operación, en ella se inicia el flujo hacia la tubería de conducción.

Válvula V_3 : válvula de desvío, conecta una tubería horizontal que conduce la mezcla al silenciador, en donde posteriormente escapa a la atmósfera. Se usa para desviar el flujo sin tener que cerrar la válvula maestra.

Válvula V_4 : válvula de Corte, permite sacar el pozo del sistema. Es necesaria su colocación en la entrada del ramal principal (de los colectores).

Funcionamiento de las válvulas:

VALVULAS	OBSERVACIONES
V_1 abierta	Si el pozo es productor, la válvula maestra no se debe cerrar completamente.
V_1, V_2, V_3, V_4 abiertas	Una parte de la mezcla se arroja a atmósfera y otra se conduce al colector.
V_2, V_4 cerradas V_3 abierta	No hay suministro a la línea de conducción, toda la producción se arroja a la atmósfera por medio del silenciador.
V_3 cerrada V_2, V_4 abiertas	Todo el fluido geotérmico se conduce al colector.
V_2 abierta V_3, V_4 cerrada	No hay descarga a la atmósfera, y al interrumpirse el paso de la mezcla al colector, se generan sobrepresiones en la línea conductora estando en operación el dispositivo de seguridad.

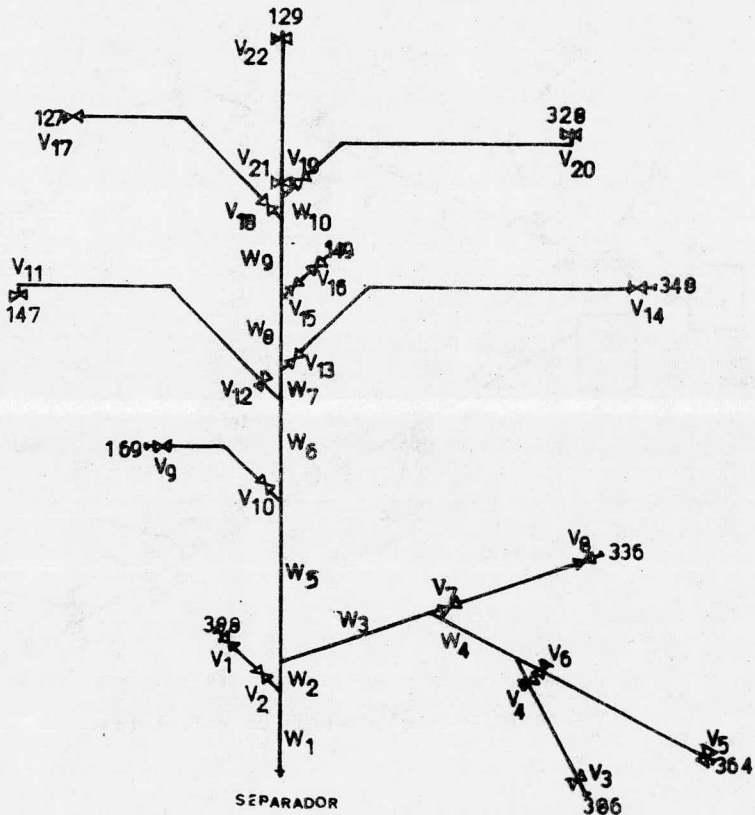
Los dispositivos de seguridad que se pueden instalar para llevar a cabo el control son discos de ruptura o válvulas de seguridad [14].

Se recomienda utilizar discos de ruptura debido a los problemas de fuga y menor confiabilidad que tendría la válvula de seguridad después de operar manejando el fluido geotérmico que es altamente incrustante. El disco de ruptura debe colocarse antes de válvula de corte V_4 .

IV.1.5.2 Control en los Colectores.

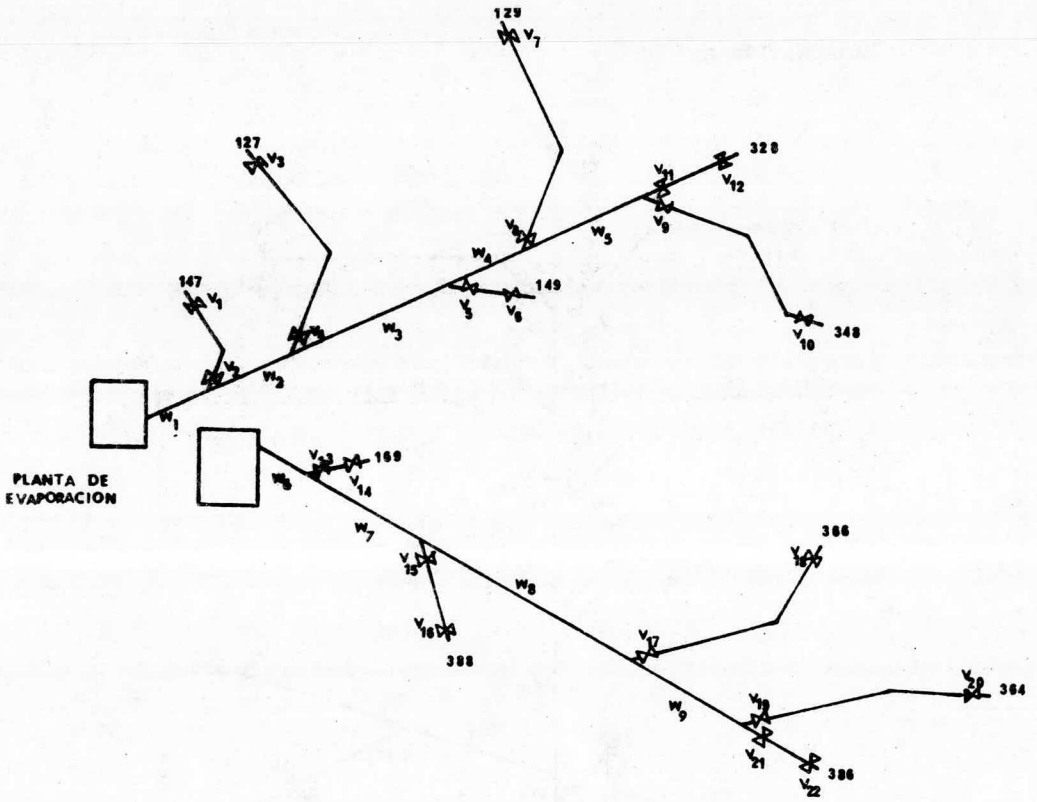
Para las alternativas A y B se proponen los siguientes arreglos para el control de presión y flujo.

ALTERNATIVA A:



Arreglo para el control de colectores.

ALTERNATIVA B:



Arreglo para el control de colectores.

Con los arreglos de válvulas definidos se procede a seleccionar un pozo y se elimina arbitrariamente (considerandolo pozo de respaldo) se analiza el comportamiento del sistema en cada tramo, en función de los flujos máscicos que circulan por los mismos. Se repite el proceso anterior con pozos diferentes y se obtienen las tablas IV.1 y IV.2 para las alternativas A y B respectivamente.

ALTERNATIVA A:

POZO	CARACTERISTICA	CONTROL
388	$W_1 = 10/11 W_{1N}$ $\Delta P < \Delta P_N$	V_1, V_2 cerrada
386	$W_4 = 1/2 W_{4N}$ $W_3 = 2/3 W_{3N}$ $\Delta P < \Delta P_N$	V_3, V_4 cerrada
169	$W_5 = 6/7 W_{5N}$ $W_2 = 9/10 W_{2N}$ $W_1 = 10/11 W_1$ $\Delta P < \Delta P_N$	V_9, V_{10} cerrada
147	$W_6 = 5/6 W_{6N}$	V_{11}, V_{12} cerrada

$$W_5 = 6/7 W_{5N}$$

$$W_2 = 9/10 W_{2N}$$

$$W_1 = 10/11 W_{1N}$$

348

$$W_7 = 4/5 W_{7N}$$

$$W_6 = 5/6 W_{6N}$$

$$W_5 = 6/7 W_{4N}$$

$$W_2 = 9/10 W_{2N}$$

$$W_1 = 10/11 W_{1N}$$

V_{13}, V_{14} cerrada

149

$$W_8 = 3/4 W_{8N}$$

$$W_7 = 4/5 W_{7N}$$

$$W_6 = 5/6 W_{6N}$$

$$W_5 = 6/7 W_{5N}$$

$$W_2 = 9/10 W_{2N}$$

$$W_1 = 10/11 W_{1N}$$

V_{15}, V_{16} cerrada

127

$$W_9 = 2/3 W_{9N}$$

$$W_8 = 3/4 W_{8N}$$

$$W_7 = 4/5 W_{7N}$$

$$W_6 = 5/6 W_{6N}$$

$$W_5 = 6/7 W_{5N}$$

$$W_2 = 9/10 W_{2N}$$

$$W_1 = 10/11 W_{1N}$$

V_{17}, V_{18} cerrada

ALTERNATIVA B:

POZO	CARACTERISTICA	CONTROL
147	$W_1 = 5/6 W_{1N}$ $\Delta P < \Delta P_N$	V_1, V_2 cerradas
127	$W_1 = 5/6 W_{1N}$ $W_2 = 4/5 W_{2N}$ $\Delta P < \Delta P_N$	V_3, V_4 cerradas
149	$W_1 = 5/6 W_{1N}$ $W_2 = 4/5 W_{2N}$ $W_3 = 3/4 W_{3N}$	V_5, V_6 cerradas
129	$W_1 = 5/6 W_{1N}$ $W_2 = 4/5 W_{2N}$ $W_3 = 3/4 W_{3N}$ $W_4 = 2/3 W_{4N}$	V_7, V_8 cerradas

Considerando que existe solo un pozo de respaldo, se muestra el comportamiento de los flujos y presiones para un ramal colector, mientras que el otro ramal opera con el total de los pozos restantes.

En las tablas se observa que mientras más alejado se encuentra el pozo de respaldo del equipo separador se afectan más las condiciones de trabajo de las líneas conductoras de mezcla, las que están dimensionadas para conducir un flujo total y por consiguiente tener una pérdida de presión determinada. Lo anterior no provoca problemas puesto que los valores de diseño se obtienen en condiciones de operación para máxima capacidad.

No obstante se requiere un sistema de seguridad en todo el colector para evitar sobrepresiones que se generan por las siguientes razones:

- a) Cierre de la válvula de corte colocada en la entrada del separador.
- b) Incrementos en la producción de los pozos integrados al colector.
- c) Transitorios en el funcionamiento de la planta.

El sistema de seguridad es similar al que se utiliza en los pozos, que consiste en colocar un disco de ruptura antes de la válvula de corte que conecta la línea con el ramal principal. También se coloca un dispositivo al final del colector que sea capaz de eliminar las sobrepresiones de manera rápida para que no se dañe la línea principal de conducción de mezcla ni el separador.

IV.1.5.3 Control en los separadores:

Los separadores se deben proteger de sobrepresiones en dos situaciones (ver figura 4.10): al operar la válvula de esfera o al cerrarse la válvula de compuerta colocada en la línea de vapor, sin que se halla accionado el dispositivo de seguridad colocado en la entrada del separador.

Para prever esta situación se recomienda instalar dos dispositivos de protección, el primero ajustado a la presión de diseño del separador y montado en el mismo; el segundo colocado en la línea de salida de vapor, entre el separador y la válvula de esfera [14].

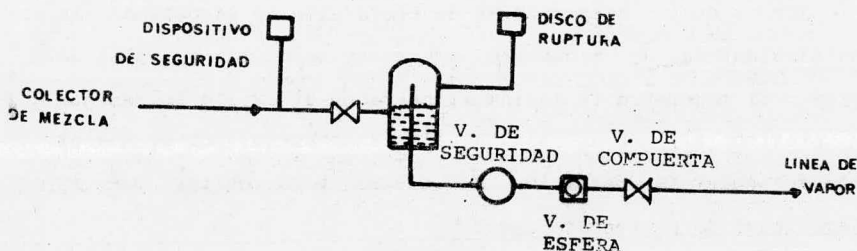


Fig. 4.10 Control en los separadores.

Para el primer elemento de protección se puede utilizar un disco de ruptura o una válvula de seguridad, aunque por el costo se recomienda que el elemento de protección del separador sea un disco de ruptura. Para el segundo dispositivo se puede emplear una válvula de seguridad o un disco de ruptura instalado con una válvula de compuerta para aislar el ramal de vapor, para este caso se recomienda el uso de válvulas de

seguridad porque la presión de ajuste es más cercana a la de operación y al generarse condiciones transitorias se puede accionar momentáneamente la válvula y restituir en forma inmediata la operación, lo cual no se logra con el disco de ruptura. Además el tener elementos de protección de diferentes tipos reduce las posibilidades de una falla simultánea de los dos dispositivos de protección.

Con un arreglo como el sugerido (fig. 4.10) al existir sobrepresiones en primer lugar se abre la válvula de seguridad y en caso de falla en la operación se acciona el disco de ruptura instalado en el separador.

Además de los dispositivos de protección se recomienda la instalación de un manómetro aguas arriba de las válvulas de corte. El manómetro le indica al operador si existe incremento de presión al cerrar alguna válvula de corte, por lo que se debe suspender la operación de cierre para evitar que el dispositivo de protección opere.

IV.1.5.4 Control en las líneas de vapor.

El control en la conducción del vapor requiere de la instalación de un sistema de regulación y protección automática con capacidad para manejar el 100% del flujo de vapor que alimenta la planta.

El sistema de regulación se coloca a una distancia de aproximadamente 100 metros antes del secador, su función es la de descargar a la atmósfera el vapor no requerido en la planta y tener la posibilidad de restablecer automáticamente la alimentación al desaparecer el origen de la sobrepresión.

Las sobrepresiones en la línea de vapor se pueden presentar por las siguientes causas:

- a) Rechazo de la carga en la turbina.
- b) Cierre innecesario de las válvulas de ingreso de vapor a la turbina.
- c) Cierre de la válvula de entrada al secador para mantenimiento de la turbina.
- d) Transitorios de funcionamiento de pozos y planta.

Las sobrepresiones pueden presentarse estando en operación la turbina o durante el mantenimiento. Además de las sobrepresiones se consideran las bajas de presión que se pueden presentar cuando los pozos entregan menor cantidad de flujo o cuando alguno de ellos es puesto fuera de servicio sin que se agregue otro para sustituirlo, por lo tanto para mantener las condiciones de operación de la turbina se propone la instalación de dispositivos detectores de presión y además que el control de presión funcione con un controlador PI, llevándose a cabo de la siguiente manera (ver figura 4.11):

El sensor a transmisor de presión (P.T.) colocado a la entrada de la turbina manda una señal (valor real) representativa de la presión existente en ese punto al comparador (PIC) en donde se compara con el valor de ajuste, la señal resultante va al controlador para que éste mande otra señal al actuador de la válvula de recirculación de vapor, permitiendo ya sea bién el paso del vapor a la turbina o el desfoque del mismo a la atmósfera manteniendo de éste modo la caída de presión necesaria para el correcto funcionamiento de la turbina [16].

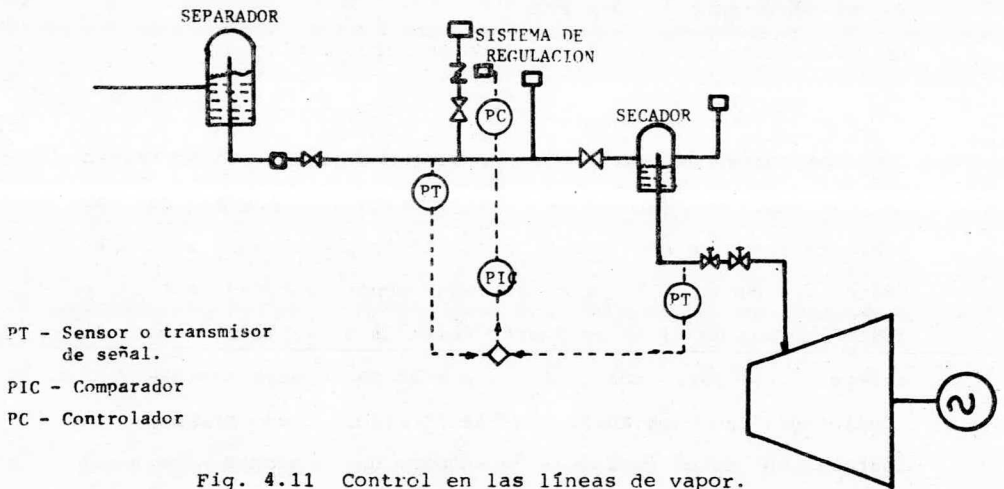
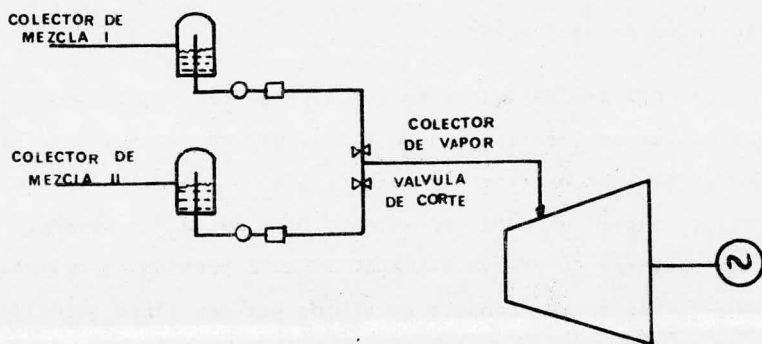


Fig. 4.11 Control en las líneas de vapor.

El sistema de control para la alternativa B es análogo al anterior el único cambio es que al colectarse también el vapor se requiere de la instalación de válvulas y dispositivos de seguridad en el colector de vapor.

En el arreglo que se muestra a continuación se observa que una vez realizada la separación de la mezcla el vapor se conduce al colector, el que se aísla mediante una válvula de corte.



Al igual que en los colectores de mezcla se preve la situación de que al cerrarse la válvula de corte sin que se accione alguna derivación para descargar el vapor se pueden generar sobrepresiones en el ramal.

Esta situación se resuelve con los dispositivos de seguridad con que cuenta el separador, los que se accionan al detectar las sobrepresiones en la línea.

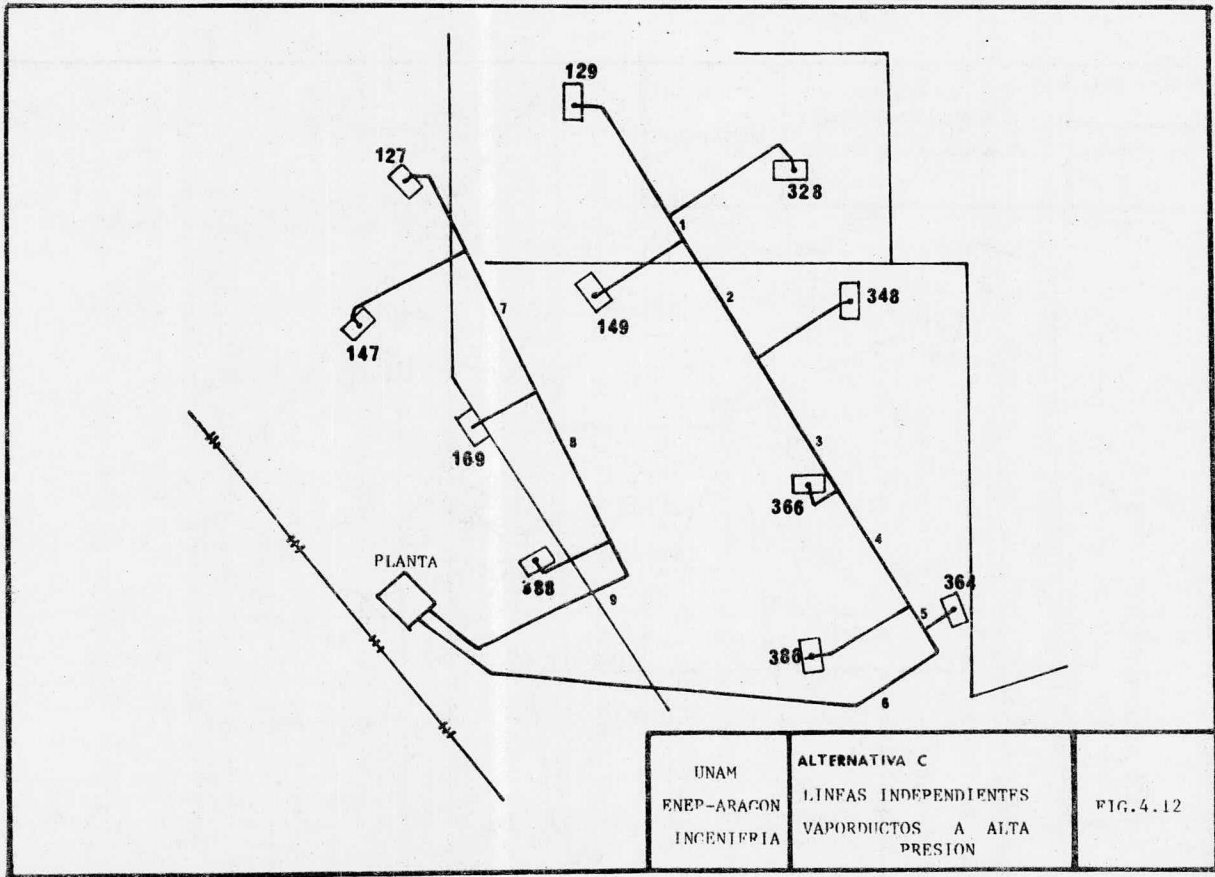
IV.2 ALTERNATIVA C:

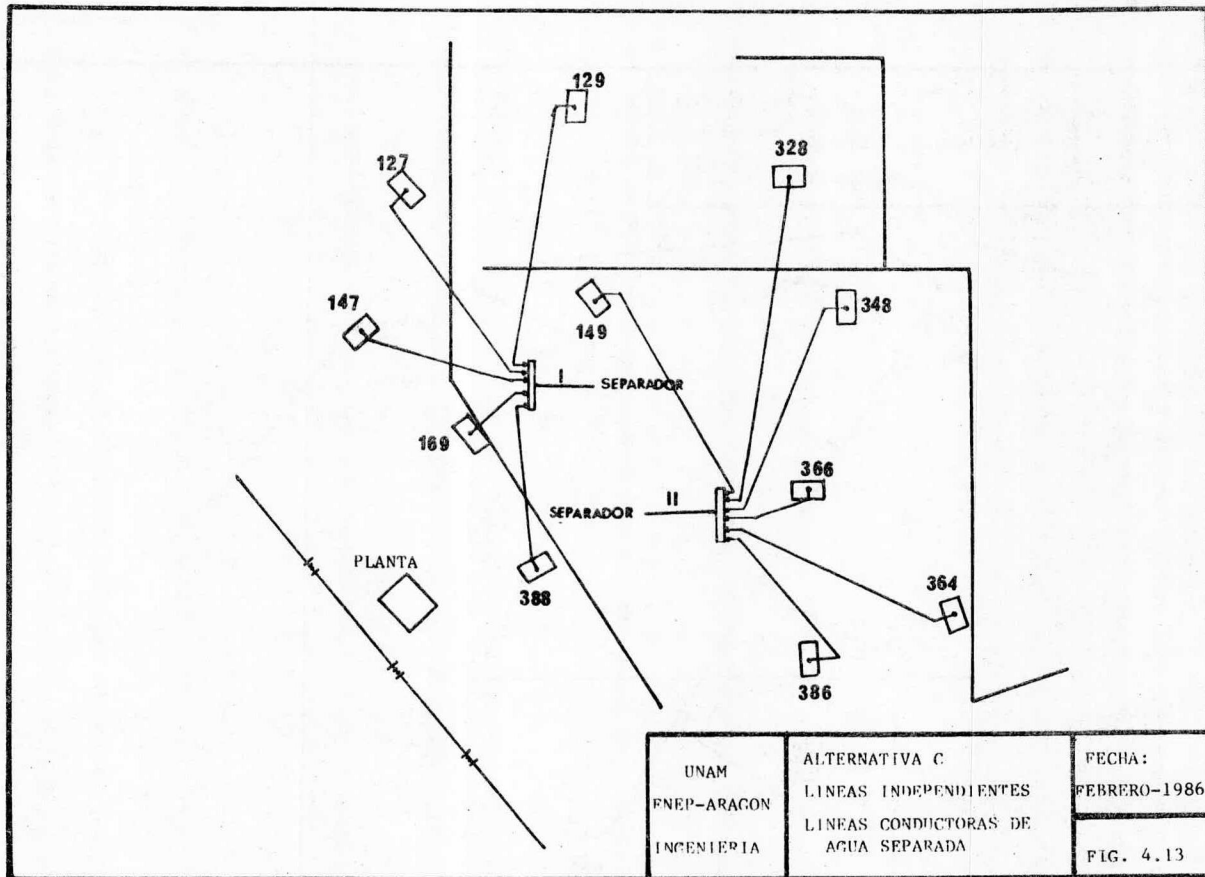
IV.2.1 Descripción.

De igual modo que para los colectores se define un arreglo que satisfaga las condiciones necesarias en la conducción de fluido geotérmico, por medio de líneas independientes. En esta alternativa se propone coleccionar el vapor y el agua separada conducirlos a través de líneas independientes hasta un evaporador de baja presión.

El análisis se inicia en los separadores, que para esta alternativa se localizan en la salida de los pozos geotérmicos. Como ya se mencionó los separadores tienen dos salidas, una que entrega vapor a alta presión y otra de agua separada. Las líneas por las que fluye el vapor de alta presión se coleccionan y posteriormente se conduce el fluido por una línea principal a la turbina de presión mixta. Por otro lado el agua separada se transporta al hasta un cabezal en donde convergen las líneas y de ahí pasa la mezcla al separador de baja presión, obteniéndose por un lado vapor de baja presión y por otro agua de desecho.

El arreglo para las líneas conductoras de vapor de alta presión se muestra en la figura 4.12. Las líneas por las que fluye agua separada así como las que transportan el vapor de baja presión se muestran en la figura 4.13.





UNAM
FNEP-ARACON
INGENIERIA

ALTERNATIVA C
LINEAS INDEPENDIENTES
LINEAS CONDUCTORAS DE
AGUA SEPARADA

FECHA:
FEBRERO-1986

FIG. 4.13

IV.2.2 GENERALIDADES SOBRE EL ANALISIS TERMODINAMICO:

IV.2.2.1 Dimensionamiento de las líneas de vapor.

El análisis se realiza de los separadores a la turbina, para esta alternativa es válido hacerlo puesto que se conoce la presión de operación de los separadores (Anexo 1).

Los cálculos se efectúan con un flujo promedio de 250,000 kg/h por pozo. No se usan los flujos mostrados en la tabla B del anexo 1 porque se obtienen a partir de condiciones de trabajo diferentes y lo que se desea en el presente trabajo es comprobar si con un cambio de arreglo pero igual cantidad de flujo se genera el vapor necesario para alimentar la turbina, por ésta razón se trabaja con un flujo de 250,000 kg/hr.

Con los valores de flujos máscicos y presiones de separación se obtienen para cada separador los flujos de vapor y de agua separada [Anexo 2-C]. Con los valores obtenidos se procede a calcular el diámetro de los vaporductos de acuerdo a lo establecido en el Anexo 2-B, así como a determinar las características de los separadores (Anexo 2-D). Todos los separadores se consideran iguales debido a que las presiones de operación y los flujos máscicos son muy parecidos. Por último se determinan las pérdidas de presión en las líneas de vapor, verificandose que la presión del vapor a la entrada de la turbina satisfaga las condiciones de operación de la misma. El desarrollo de los cálculos efectuados se muestra en el anexo

3-C.

La determinación de los diámetros y las pérdidas de presión se realiza por medio de un programa de cómputo.

IV.2.2.2 Análisis del agua separada.

En la figura 4.13 se observa el arreglo elaborado para la conducción del agua separada. En la conducción de la misma, se presenta la formación de flujo en dos fases por lo que es necesario tomar en cuenta el fenómeno para el dimensionamiento de las líneas. Su análisis inicia en la salida del separador primario y por principio se define la presión que existe en la entrada de las líneas, no se considera que sea igual a la del separador porque para llevar a cabo la evaporación en el mismo se provoca una pérdida de presión, además de que se coloca en la entrada de la tubería una placa de orificio para tener una evaporación por estrangulamiento en el agua separada.

De la presión de entrada real de las líneas hasta la entrada del evaporador secundario existe una pérdida de presión permisible determinada por la presión a que opera el equipo. En base a estas restricciones se dimensionan las líneas conductoras de agua separada.

Los diámetros de las líneas así como las pérdidas de presión se obtienen por medio del mismo programa de cómputo utilizado en las alternativas anteriores. Para la alternativa C la utilización del programa resultó menos laboriosa debido a que se conocen las presiones de operación de los separadores (presiones de entrada), evitándose de esta manera el uso de un método iterativo.

Una vez que se determinan los diámetros de las líneas de agua separada se hacen converger en un cabezal, colocado antes del separador secundario, descargando en él los flujos másicos que transportan las líneas. El comportamiento de los flujos al mezclarse se desconoce, pero con el fin de determinar las características de la mezcla resultante, que alimenta al separador, se realiza un balance de masa y energía [Anexo 3-C].

Al llevarse a cabo la segunda etapa de separación se obtiene el vapor de baja presión que alimenta la turbina de presión mixta y el agua separada que se conduce a la laguna de evaporación.

IV.2.2.3 Conducción del Agua Remanente.

El agua separada que se obtiene del segundo evaporador se conoce como agua de desecho o remanente.

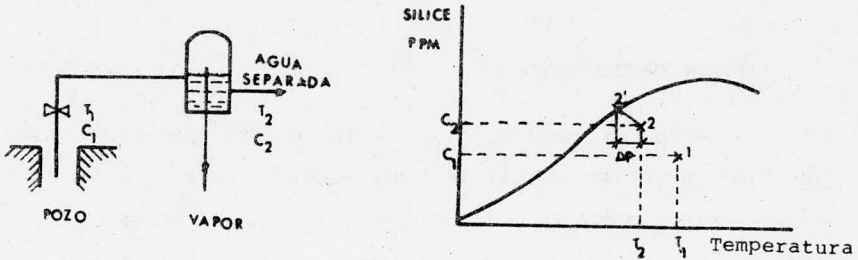
La forma de transportarla a la laguna de evaporación es importante por los efectos y problemas que provoca. En algunos casos el agua se desecha por medio de canales a la laguna de evaporación, esto trae consigo la contaminación de las aguas que se utilizan para riego, otro inconveniente es que existe un canal por cada separador, incrementandose por consiguiente el costo del arreglo por los trabajos de obra civil requeridos.

Otra opción es la de desecharla por medio de tuberías de acero, en caso de seleccionar este método se debe considerar que las líneas requieren sustituirse de manera periódica por el alto contenido de sólidos incrustantes que contiene el agua remanente.

En la presente alternativa se propone coleccionar también el agua de desecho de los separadores secundarios y conducirla por medio de una línea única hasta un canal, haciendo necesario el análisis de las incrustaciones en las tuberías conductoras de agua separada.

IV.2.3 INCRUSTACIONES.

El mecanismo que se lleva a cabo para la formación de incrustaciones en el agua separada es el siguiente:



1.- Debido a la pérdida de presión y temperatura que sufre la mezcla desde la salida del pozo al separador, se tiene un aumento de concentraciones (pasa del punto 1 al punto 2).

2.- Posteriormente al depresurizarse la mezcla en el separador se tiene un contenido de silice mayor (C_2), siendo el comportamiento real la combinación de ambas propiedades (Presión y Temperatura).

La línea punteada (fig.4.14) muestra el proceso real de precipitación de silice el cual inclusive puede superar la línea de saturación, fenómeno que comunmente ocurre y que hace más grave la presencia de incrustaciones en las tuberías.

En el anexo 8 se muestra la determinación de la sílice en estado de suspensión, en base a un promedio obtenido en el agua separada de Cerro Prieto II, considerandose igual para todos los pozos.

IV.2.4 MANTENIMIENTO.

El costo de operación y mantenimiento para Centrales Geotermoeléctricas comprende tanto el de la central misma como el del campo, que a su vez incluye los costos previstos por concepto de reemplazo y mantenimiento de pozos e instalaciones superficiales.

En base a experiencias en Cerro Prieto II, los costos obtenidos para las centrales de 110 MW son de 5.58 \$/kWh, considerando una productividad de 8 MW/pozo (1985).

Para el análisis de las alternativas se recomienda que el mantenimiento en las tuberías se realice en periodos de dos años y hacer un cambio total de la instalación en el transcurso de 15 años.

Todos los cálculos mencionados en éste capítulo se analizan en su respectivo anexo y en el siguiente capítulo se muestran los resultados completos para cada alternativa.

IV.3 EVALUACION ECONOMICA.

La evaluación de las alternativas se elabora con base en los tres criterios siguientes:

- a) La evaluación se hace desde el punto de vista beneficios.
- b) Siempre que se pueda las diferencias entre las alternativas se debe reducir a cantidades de dinero.
- c) Generalmente se acepta la alternativa de inversión mínima que cumpla con los requerimientos especificados, excepto cuando exista alguna razón o diferencia entre alternativas que no pueda ser reducida o transformada en dinero y que sea de suficiente peso para influir en la selección, es decir, en ocasiones la selección está basada en factores subjetivos y no económicos.

Para efectuar la evaluación existen parámetros económicos (Anexo 9) que resultan de gran utilidad.

Los factores a evaluar en el presente trabajo son:

- a) Costo de líneas de conducción de mezcla y agua separada (Anexo 10)
- b) Costo de instalaciones superficiales (Anexo 12).
- c) Costo de mantenimiento (Anexo 10)
- d) Costo de obra civil (Anexo 12)
- e) Costo de materiales y mano de obra (Anexo 12)

CAPITULO V

RESULTADOS

V.1 RESULTADOS TECNICOS

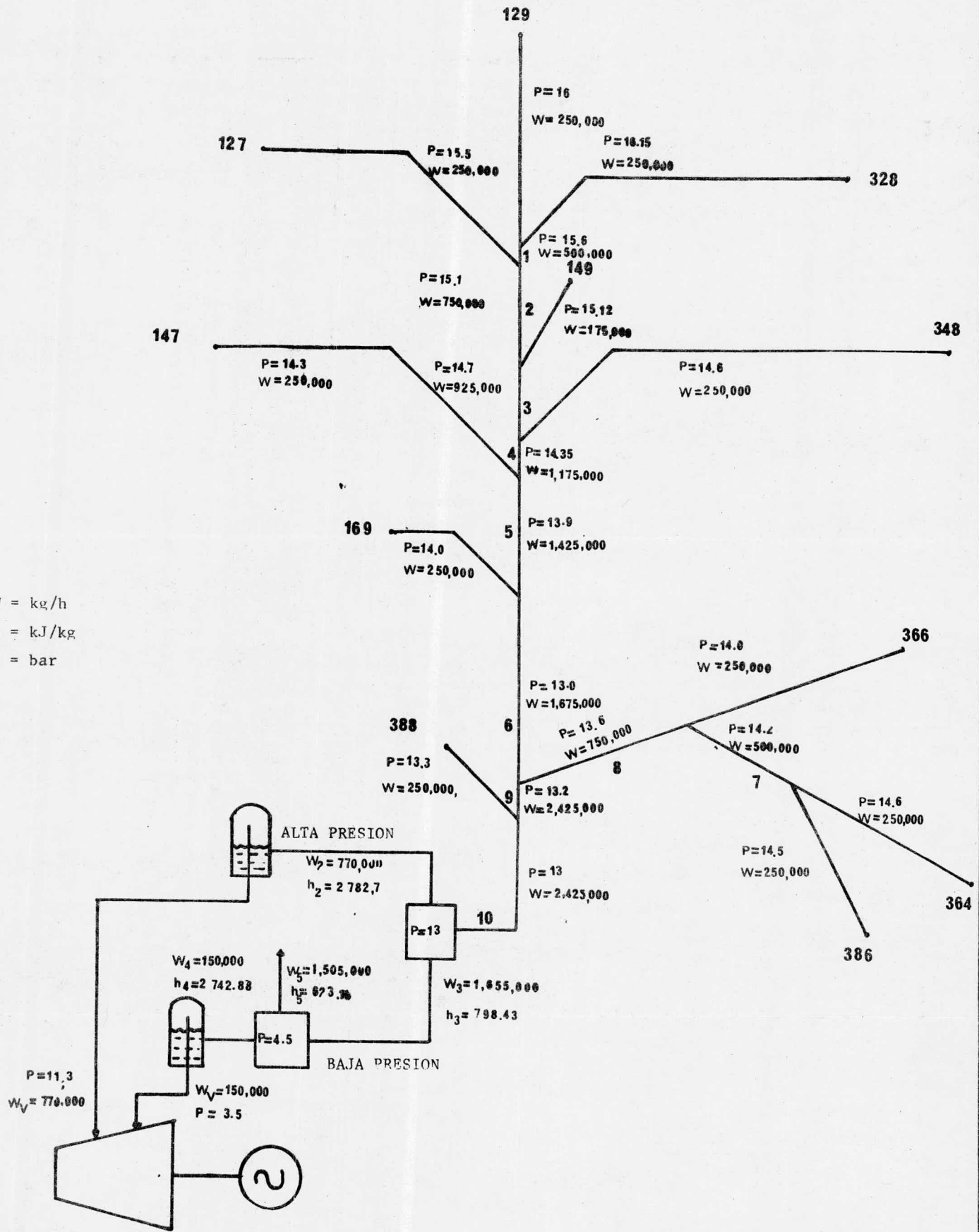
V.1.1 Condiciones de Operación

Las figura 5.1, 5.2, 5.3 muestran los arreglos de las alternativas analizadas. Los cuales comprenden las líneas de vapor, de mezcla y equipos, así como las condiciones de trabajo bajo las que puede operar (de acuerdo al análisis realizado).

ALTERNATIVA A:

El arreglo de vaporductos es sencillo debido a que únicamente existe un ramal para coleccionar la mezcla proveniente de todos los pozos (fig. 5.1). Las líneas conductoras de mezcla muestran las condiciones de operación como son las presiones de salida y flujos máxicos de cada tramo.

W = kg/h
h = kJ/kg
P = bar



UNAM ENEP-ARACON INGENIERIA	ALTERNATIVA A ARREGLO DE COLECTORES	FECHA: FEBRERO-86
	RESULTADOS	FIG. 5.1

ALTERNATIVA B:

La figura 5.2 muestra un arreglo más complicado de los vaporductos, debido a la existencia de más de un colector de mezcla. Lo anterior trae como consecuencia que las líneas de vapor también se junten, es decir que convergen en un colector de vapor o vaporducto.

El arreglo de las líneas de mezcla también muestra las presiones de operación y flujos máxicos resultantes.

Los arreglos de colectores de mezcla presentan una idea general del comportamiento de las presiones, de las que se pueden hacer dos observaciones importantes:

- 1.- Las presiones de operación de los pozos más alejados son las mayores.
- 2.- Las presiones en los puntos de confluencia son muy parecidas. Esto último se planteo como condición para utilizar colectores de mezcla.

ALTERNATIVA C:

Para ésta alternativa se muestran dos arreglos (figuras 5.3 y 5.4).

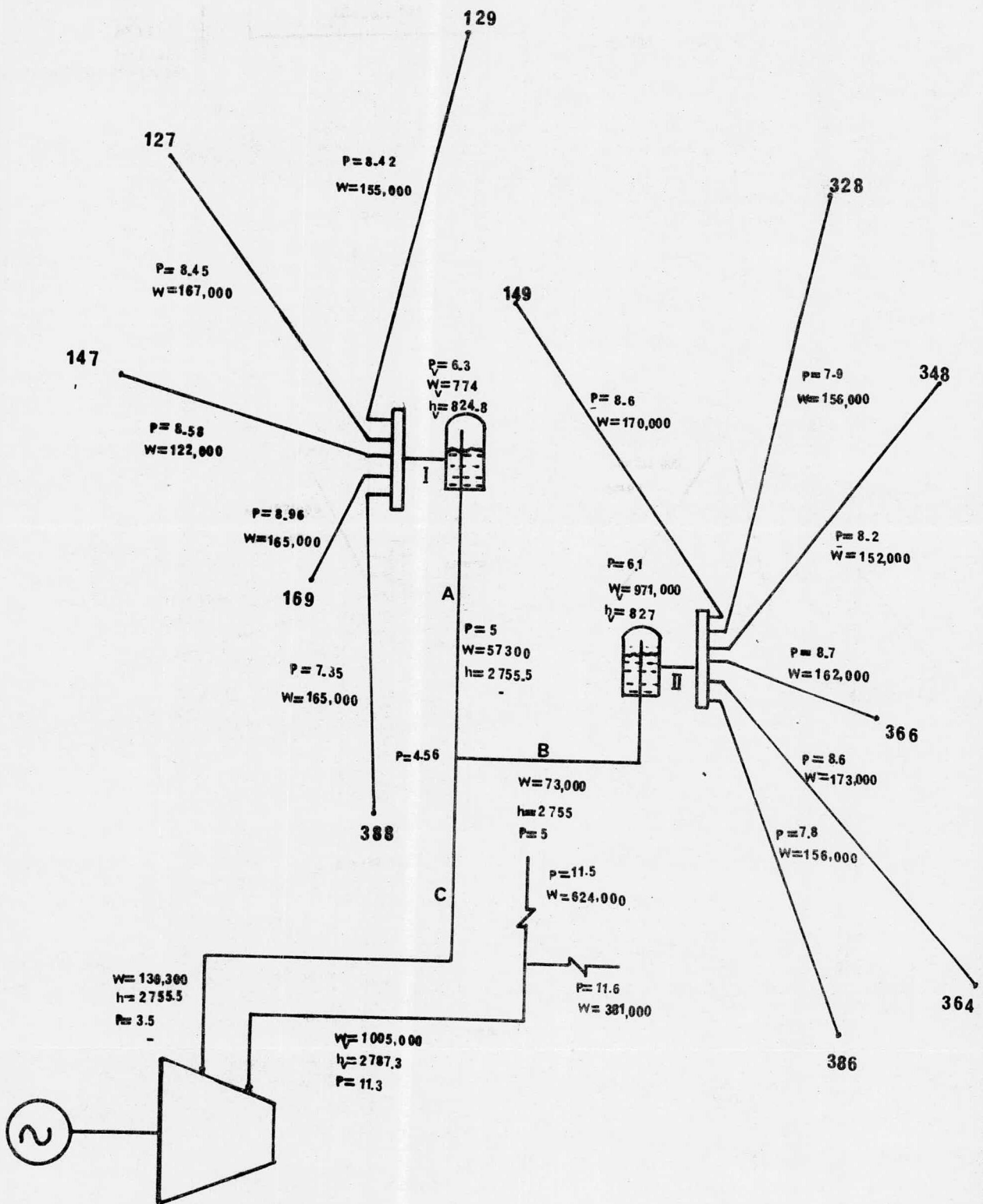
La figura 5.3 comprende las líneas de agua separada, cabezales, separadores secundarios y líneas de vapor de baja presión.

La figura 5.4 corresponde a las líneas conductoras de vapor a alta presión, en donde se observa que también el vapor se colecta.

V.1.2 Dimensionamiento de tuberías.

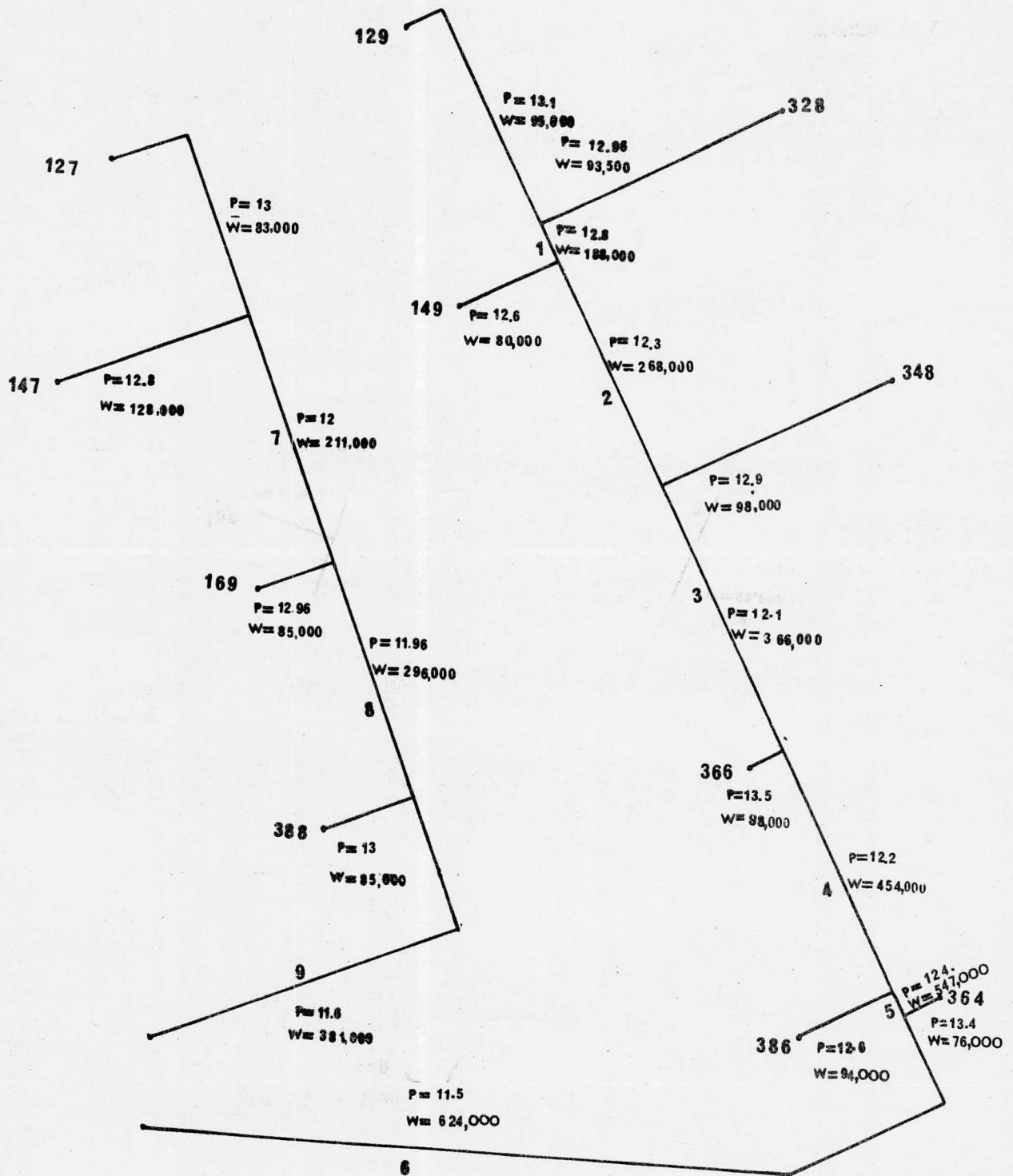
El análisis no aporta únicamente presiones y flujos máxicos sino también diámetros, longitudes de las líneas, entalpias de los flujos, pérdidas de presión, etc.

Las tablas V.1, V.2 y V.3 contienen información al respecto.



$W = \text{kg/h}$
 $h = \text{kJ/kg}$
 $P = \text{bar}$

UNAM ENEP-ARAGON INGENIERIA	ALTERNATIVA C: LINEAS INDEPENDIENTES TUBERIAS DE AGUA SEPARADA Y VAPORPRODUCTOS DE BAJA PRESSION	FECHA: FEBRERO-1987
		FIG. 5.3



W = kg/h
 h = kJ/kg
 P = bar

UNAM ENEP-ARAGON INGENIERIA	ALTERNATIVA C: LINEAS INDEPENDIENTES VAPORDUCTOS DE ALTA PRESION	FECHA: FEBRERO-1987
	RESULTADOS	FIG. 5.4

TRAMO	LONGITUD (M)	DIAMETRO NOMINAL (pulgadas)	CEDULA	ENTALPIA KJ/Kg	PRESION DE ENTRADA (bar)	PERDIDA DE PRESION (bar)	PATRON DE FLUJO.
129	360	16	40	1425.43	18	1.99	Pulsante
328	540	16	40	1423.24	19	2.85	Pulsante
127	408	16	40	1423.24	18.5	2.97	Pulsante
1	108	22	30	1423.24	16.0	0.45	Pulsante
149	35	12	40	1376.46	15.5	0.37	Pulsante
2	108	26	20	1423.24	15.5	0.43	Pulsante
348	648	16	40	1423.24	18.3	3.72	Pulsante
3	198	30	40	1414.44	15.1	0.40	Pulsante
147	630	16	40	1423.24	18	3.7	Pulsante
4	90	34	40	1416.32	14.6	0.25	Pulsante
169	306	16	40	1425.43	16.0	1.20	Anular
5	180	38	---	1417.92	14.3	0.35	Pulsante
364	540	16	40	1423.24	17.8	3.15	Pulsante
U N A M ENEP ARAGON.		ALTERNATIVA A: COLECTOR. Líneas conductoras de mezcla.					TABLA V.1

TRAMO	LONGITUD (M)	DIAMETRO NOMINAL (pulgadas)	CEDULA	ENTALPIA KJ/Kg	PRESION DE ENTRADA (bar)	PERDIDA DE PRESION (bar)	PATRON DE FLUJO	
386	234	16	40	1423.24	16.5	2.0	Pulsante	
7	126	24	20	1423.24	14.57	0.39	Pulsante	
366	370	16	40	1444.17	16.5	2.50	Anular	
8	180	28	20	1423.24	14.1	0.52	Anular	
6	415	40	---	1419.5	13.97	0.92	Anular	
388	200	16	40	1519.5	15.0	1.73	Anular	
9	54	48	---	1419.34	13.3	0.10	Anular	
10	100	48	---	1428.7	13.2	0.19	Anular	
U N A M ENEP ARAGON		ALTERNATIVA A: COLECTOR. Líneas conductoras de mezcla					TABLA V.1	

TRAMO	LONGITUD (M)	DIAMETRO NOMINAL (pulgadas)	CEDULA	ENTALPIA KJ/Kg	PRESION DE ENTRADA (bar)	PERDIDAS DE PRESION (bar)	PATRON DE FLUJO
Alta Presión	500	40	---	2782.73	12.0	0.264	Vapor
Baja presión	500	26	20	2742.88	4.5	0.385	Vapor
U N A M ENEP ARAGON		ALTERNATIVA A: Líneas conductoras de vapor de alta y baja presión.					TABLA V.1

TRAMO	LONGITUD (M)	DIAMETRO NOMINAL (pulgadas)	CEDULA	ENTALPIA KJ/Kg	PRESION DE ENTRADA (bar)	PERDIDAS DE PRESION (bar)	PATRON DE FLUJO
328	296	16	40	1423.24	17.0	1.70	Pulsante
348	435	16	40	1423.24	17.8	2.47	Pulsante
129	525	16	40	1425.42	17.5	3.15	Pulsante
1	200	22	30	1423.24	15.3	0.90	Pulsante
149	72	14	40	1376.46	14.3	0.46	Pulsante
2	145	28	20	1423.79	14.4	0.41	Anular
127	450	16	40	1423.24	16.8	3.46	Anular
3	310	32	40	1414.98	13.9	0.74	Anular
147	180	18	40	1425.42	13.5	0.71	Pulsante
4	220	36	40	1416.74	13.2	0.46	Anular
5	90	36	40	1418.26	12.7	0.28	Anular
U N A M ENEP ARAGON		ALTERNATIVA B: COLECTOR I: Líneas conductoras de mezcla.					TABLA V.2

TRAMO	LONGITUD (M)	DIAMETRO NOMINAL (pulgadas)	CEDULA	ENTALPIA kJ/Kg	PRESION DE ENTRADA (bar)	PERDIDAS DE PRESION (bar)	PATRON DE FLUJO
364	400	16	40	1423.24	18.0	2.22	pulsante
386	30	16	40	1423.24	16.0	0.18	Pulsante
366	470	16	40	1444.17	17.0	3.0	Anular
6	435	22	30	1423.24	15.8	1.95	Anular
388	235	18	40	1519.5	14.0	1.10	Anular
7	360	28	20	1430.22	13.9	1.10	Anular
169	90	18	40	1425.42	12.7	0.38	Anular
8	270	34	40	1452.54	12.8	0.62	Anular
9	72	36	40	1447.11	12.3	0.20	Anular
U N A M ENEP ARAGON		ALTERNATIVA B: COLECTOR II: Líneas conductoras de mezcla.				TABLA 5.2	

TRAMO	LONGITUD (M)	DIAMETRO NOMINAL (pulgadas)	CEDULA	ENTALPIA KJ/Kg	PRESION DE ENTRADA (bar)	PERDIDA DE PRESION (bar)	PATRON DE FLUJO	
1-2	560	40	---	2781.25	11.62	0.53	Vapor	
1'-2'	560	24	20	2739.81	4.17	0.40	Vapor	
2-3	190	30	20	2782.73	12.0	0.30	Vapor	
2'-3'	190	18	40	2742.88	4.5	0.26	Vapor	
2-4	300	28	20	2784.12	12.5	0.53	Vapor	
2'-4'	300	18	40	2747.53	5.0	0.40	Vapor	
U N A M ENEP ARAGON		ALTERNATIVA B: Líneas conductoras de vapor de alta y baja presión					TABLA V.2	

TRAMO	LONGITUD (M)	DIAMETRO NOMINAL (pulgadas)	CEDULA	ENTALPIA KJ/Kg	PRESION DE ENTRADA (bar)	PERDIDAS DE PRESION (bar)	PATRON DE FLUJO
127	780	12	40	825.71	10	1.54	Pulsante
147	540	10	40	822.5	10	1.42	Pulsante
169	225	10	40	818.6	10	1.04	Pulsante
388	445	10	40	827.0	10	2.64	Pulsante
129	900	12	40	830.1	10	1.58	Pulsante
I	80	16	40	824.8	10	2.04	Pulsante
149	690	12	40	825.7	10	1.39	Pulsante
328	1100	12	40	830.1	10	2.06	Pulsante
348	812	12	40	822.5	10	1.77	Pulsante
366	260	10	40	826.8	10	1.28	Pulsante
364	630	12	40	827.0	10	1.33	Pulsante
386	424	10	40	830.1	10	2.20	Pulsante
II	100	18	40	827.0	10	2.20	Pulsante
U N A M ENEP ARAGON		ALTERNATIVA C: Líneas conductoras de aqua separada.				TABLA V.3	

TRAMO	LONGITUD (M)	DIAMETRO NOMINAL (pulgadas)	CEDULA	ENTALPIA KJ/Kg	PRESION DE ENTRADA (bar)	PERDIDAS DE PRESION (bar)	PATRON DE FLUJO
129	414	16	40	2788.0	14.11	1.01	Vapor
328	345	16	40	2787.8	13.80	0.83	Vapor
1	110	22	30	2787.9	13.03	0.20	Disperso
149	216	14	40	2787.58	13.4	0.82	Disperso
2	270	26	20	2787.8	12.7	0.41	Vapor
348	290	16	40	2786.8	13.69	0.77	Disperso
3	380	30	20	2787.54	12.61	0.50	Vapor
366	20	12	40	2787.15	13.7	0.15	Vapor
4	450	32	40	2788.1	12.83	0.63	Vapor
386	235	14	40	2787.8	13.8	1.20	Disperso
5	20	32	40	2788.1	12.42	0.04	Vapor
364	110	14	40	2787.24	13.77	0.37	Disperso
6	1300	38	---	2787.5	12.89	1.38	Vapor
U N A M ENEP ARAGON		ALTERNATIVA C: Líneas conductoras de vapor de alta presión					TABLA V.3

TRAMO	LONGITUD (M)	DIAMETRO NOMINAL (pulgadas)	CEDULA	ENTALPIA KJ/Kg	PRESION DE ENTRADA (bar)	PERDIDAS DE PRESION (bar)	PATRON DE FLUJO
127	360	16	40	2787.83	13.69	0.70	Disperso
147	270	18	40	2786.65	13.50	0.66	Disperso
7	380	22	30	2787.11	12.92	0.88	Vapor
169	145	16	40	2786.04	13.26	0.30	Disperso
8	435	28	20	2786.8	12.51	0.55	Vapor
388	165	14	40	2787.24	13.76	0.69	Disperso
9	650	30	20	2786.9	12.52	0.94	Vapor
U N A M ENEP ARAGON		ALTERNATIVA C Lineas conductoras de vapor de alta presión.					TABLA V.3

TRAMO	LONGITUD (M)	DIAMETRO NOMINAL (pulgadas)	CEDULA	ENTALPIA KJ/Kg	PRESION DE ENTRADA (bar)	PERDIDAS DE PRESION (bar)	PATRON DE FLUJO
A	469	18	40	2755.46	5	0.5	Vapor
B	185	18	40	2755.46	5	0.38	Vapor
c	520	24	20	2755.46	4.55	0.82	Vapor
U N A M ENEP ARAGON		ALTERNATIVA C: Líneas conductoras de vapor			de baja presión		TABLA V.3

V.2 RESULTADOS ECONOMICOS.

En el análisis económico se consideran como factores constantes los siguientes:

Pozos necesarios para generar 110 MW	10 pozos.
Pozos de respaldo	1 pozo
Vida económica de la línea	15 años
Vida económica del sistema	30 años
Tasa de interés	7 %
Tasa de rendimiento	12 %
Precio del dolar (Dic.-1986)	815 de M.N.

La estimación económica se realiza en base al criterio del valor presente.

- Costo de tuberías y mantenimiento de las mismas:

Se obtiene en base a las ecuaciones del anexo 9, en las que además del costo de las tuberías se incluye el costo de materiales (apoyos, accesorios, aislamientos, etc).

Los costos mostrados están dados en moneda nacional y corresponden a Diciembre de 1986.

VALOR PRESENTE

	A [x 10 ⁶]	B [x 10 ⁶]	C [x 10 ⁶]
Líneas de agua separada o mezcla.	230	206	206
Líneas de vapor	45	84	280
Mantenimiento	18.75	18	31.4
Serie uniforme	34	36	60

- Costo de instalaciones superficiales:

Se incluyen costos por obra mecánica y civil (Anexo 12).

COSTOS

	A [x 10 ⁶]	B [x 10 ⁶]	C [x 10 ⁶]
Instalación de tuberías	1.9	2.3	4.6
Instalación de separadores	16.0	13.0	28.5
Instrumentación	0.1	0.1	0.1
Válvula esférica	1.6	1.6	1.6
Obra civil	4.5	4.9	6.0
Material	4.9	4.2	8.4
TOTAL	29.0	26.0	49.0

Por lo tanto el costo total de las instalaciones superficiales considerando un 30% de inflación es:

Costo de la alternativa x 1.3

ALTERNATIVA	COSTO DE INSTALACIONES SUPERFICIALES. [x 10 ⁶]
A	38
B	34
C	64

En el análisis se considera el costo de 11 pozos, porque aún cuando sean 10 pozos los que integran el arreglo, el pozo de respaldo se debe mantener en condiciones de operación.

- Inversión inicial.

La inversión inicial de cada alternativa es la suma de los costos del equipo de superficie más el valor presente de las líneas de mezcla y vapor.

ALTERNATIVA	INVERSION INICIAL [X 10 ⁶]
A	313
B	324
C	550

- Costo de energía por KW instalado.

El costo se obtiene aplicando la siguiente expresión:

$$CEI = \frac{\text{Inversión inicial}}{110 \text{ MW}}$$

ALTERNATIVA	COSTO POR KW/INST. \$/inst.
A	2,800
B	2,900
C	5,000.

CAPITULO VI

COMPARACION

Una alternativa es una opción independiente para una situación dada. Las alternativas en ingeniería generalmente incluyen factores tales como costo de compra del bien (costo inicial), vida anticipada del bien, costos anuales de mantenimiento, tasa de interés. Después de recopilar la información y todos los cálculos pertinentes, se realiza un análisis de ingeniería económica en donde la base de comparación es el dinero. De esta manera cuando hay varias maneras de lograr un objetivo dado, generalmente se selecciona el método que tiene el menor costo global. Cuando las alternativas disponibles tiene aproximadamente el mismo costo, los factores no cuantitativos, pueden ser utilizados como base

para seleccionar la mejor alternativa.

Por consiguiente para iniciar la comparación se analizan los parámetros económicos obtenidos:

	COSTOS		
	A [x 10 ⁶]	B [x 10 ⁶]	C [x 10 ⁶]
Líneas de vapor	45	84	280
Líneas de agua	230	206	206
Equipo de sup.	38	34	64
INVERSION TOTAL	313	324	550

De aquí que el costo por kW instalado para cada alternativa sea el siguiente:

ALTERNATIVA	COSTO POR kW/INST. \$/kW
A	2,800
B	2,900
C	5,000

Por último la serie uniforme que se necesita para asegurar la instalación y funcionalidad del sistema es :

ALTERNATIVA	SERIE UNIFORME [x 10 ⁶]
A	34
B	36
C	60

En base al factor económico la alternativa que se elimina es la C, puesto que es la más costosa. Las dos restantes tienen un costo aproximado por lo que para llevar a cabo la selección se toman en cuenta los factores técnicos involucrados.

En la comparación técnica también se incluye la alternativa de líneas independientes para tener presentes las ventajas y desventajas que ofrece la misma con respecto a los colectores.

ALTERNATIVA A:

Ventajas:

- Longitud de las tuberías de vapor menor que para las otras dos alternativas.
- Poca cantidad de equipo (5 Separadores).
- Disminución en la formación de incrustaciones.
- Existencia de un sitio único para efectuar la separación de la mezcla (planta de evaporación).
- Existencia de una línea única para la conducción de vapor, así como de agua separada.
- Ubicación de la planta de evaporación próxima a la casa de máquinas.

Desventajas:

- Compartamiento complejo de la mezcla al colectarse.
- Tuberías de gran diámetro.
- Capacidad de los separadores mayor que los que utilizan las líneas independientes.
- Presencia de flujo pulsante en la conducción de la mezcla.
- La presión de entrada del pozo más alejado es la mayor.
- El costo de las líneas conductoras de mezcla es el más alto.

ALTERNATIVA B:

Ventajas:

- Poca cantidad de equipo (4 separadores)
- Funcionamiento de cada colector de manera independiente.
- Diámetros de las tuberías para conducir mezcla menores que para la alternativa anterior.
- Longitud de las líneas de mezcla menor que en la anterior.
- Costo de mantenimiento en las líneas de mezcla menor a las otras alternativas.

Desventajas:

- Cuenta con mayor longitud de tuberías para la conducción de vapor que la alternativa anterior.
- Se colecta el vapor de baja presión.
- Existencia de lugares diferentes para llevar a cabo

la separación de las fases (uno por cada colector de mezcla).

- Presencia de flujo pulsante en la conducción de la mezcla.
- Existencia de dos líneas de agua de desecho.

ALTERNATIVA C:

Ventajas:

- No se colecta la mezcla.
- Ubicación del separador a pie de pozo.
- Pérdida de energía mínima en la mezcla.
- Funcionamiento independiente de los pozos.
- Diámetro de las tuberías menores que para las alternativas anteriores.
- Conducción de flujos másicos no muy elevados.
- Comportamiento menos complejo del flujo en dos fases que en las alternativas anteriores.

Desventajas:

- Utilización de una cantidad de equipo mayor (11 separadores).
- Existencia de alto porcentaje de incrustaciones en las líneas de agua separada.
- Gran longitud de tuberías para la conducción de vapor y agua separada.
- Existencia de colectores de vapor de alta y baja presión.

Resulta fácil observar que las tres alternativas presentan tanto ventajas como desventajas, por lo que, con un criterio más objetivo la alternativa que se selecciona como la más adecuada es la B, por las siguientes razones:

1.- Sin ser la más económica, ya que su inversión inicial excede en poco al de la alternativa A, se selecciona por la importancia de las ventajas técnicas que ofrece sobre la primera.

2.- Con la existencia de varios ramales colectores, se tiene independencia en el funcionamiento de cada uno de ellos, lo que significa que en caso de falla de alguna línea de las que se encuentran más próximas al separador, el ramal afectado queda fuera de servicio, en tanto que los otros siguen operando normalmente.

3.- El número de pozos que se colectan es pequeño, lo que conlleva a que el flujo másico que se transporta no sea muy elevado y por consiguiente que los diámetros de las líneas no sean muy grandes.

4.- Las líneas de vapor se pueden colectar, esto en realidad no es un inconveniente ya que el vapor tiene un comportamiento termodinámico fácil de controlar.

5.- Aún cuando las líneas de vapor son de longitud mayor que para la alternativa anterior, económicamente no le afecta mucho, si se tiene presente que no requieren de las misma continuidad de mantenimiento que las líneas de mezcla.

6.- Los equipos de separación no son de gran capacidad.

Por estas razones se considera que la alternativa a seleccionar es la B, de lo cual se obtienen las conclusiones mostradas en el siguiente capítulo.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

Del análisis efectuado en el presente trabajo se puede concluir que la alternativa que ofrece mayores ventajas es la Alternativa B, que consiste en coleccionar la mezcla en dos fases proveniente de los pozos geotérmicos, en varios ramales colectores de mezcla.

La alternativa B se selecciona aún sin ser la más económica. Esta decisión se fundamenta en los resultados obtenidos en el análisis técnico de cada una de las alternativas.

En cuanto a los criterios involucrados en la evaluación económica es importante hacer notar que son los mismos para las tres alternativas por lo que el costo relativo de una respecto a otra permanece constante. Además se aclara que la alternativa B no se selecciona como solución general para la conducción de flujo bifásico en Centrales Geotérmicas ya que en tal propósito intervienen parámetros decisivos que son diferentes de una Planta Geotérmica a otra, como son: la dispersión de los pozos, las propiedades termodinámicas del fluido geotérmico, y ciclo de trabajo a emplear.

Sin embargo esta alternativa se selecciona con base en las ventajas que presenta para la Central Geotérmica de Cerro Prieto II, siendo las más importantes:

- Disminución de la presencia de incrustaciones, tanto en tuberías como en accesorios y equipos. Lo anterior trae como consecuencia un mayor tiempo de vida útil de los equipos, además de reducirse el costo de mantenimiento. Este punto es importante mencionarlo ya que es uno de los problemas más graves que se presentan en las líneas.

- Disminución del equipo de superficie, aunque con diseños de mayor capacidad que los que se utilizan actualmente en Cerro Prieto. Lo anterior no es un inconveniente si se toma en cuenta que resulta más económica la construcción de un separador con capacidad un poco mayor, que la de dos o tres separadores de los que se instalan a pie de pozo.

- En los colectores se presenta la ventaja de que al colocar los separadores cerca de la casa de máquinas las condiciones de separación son muy parecidas a las de la entrada de la turbina, esto implica que la presión del separador sea menor y por lo tanto, produzca una cantidad de vapor mayor. De esta manera se sacrifica menos el pozo y se genera mayor cantidad energía.

- Con los colectores de mezcla se presenta la posibilidad de colectar el agua de desecho y conducirla por una línea a la laguna de evaporación. Con esto se logra reducir el número de canales así como el costo que implica la construcción de los mismos.

- En lo referente al sistema de control se propone que las válvulas colocadas en el ramal colector de mezcla se accionen manualmente, mientras que para las líneas de vapor así como para el ingreso del mismo a la turbina se instale un control automático.

En la conducción con líneas independientes el sistema de control en las tuberías que conducen mezcla es sencillo, ya que las líneas se dimensionan con base en la cantidad de flujo que manejarán, por lo que no existe el problema (en los colectores si suele presentarse) de que al sacar un pozo de operación las líneas conduzcan un flujo menor para el que están dimensionadas, provocando a su vez una pérdida de presión menor a la de diseño. La observación se hace para tener presente que

en caso de no tener un control adecuado se pueden presentar sobrepresiones en tramos posteriores.

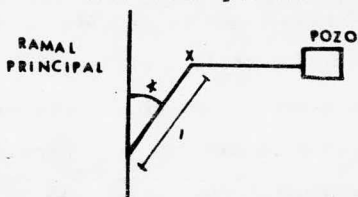
- El análisis técnico se realizó por medio de balances de energía, tomando en cuenta pérdidas de presión, procesos isoentálpicos y además reversibles. En lo referente al análisis de flujo bifásico se maneja superficialmente dada la complejidad de comportamiento del mismo. En los resultados se muestra el patrón de flujo existente en cada tramo, sin embargo no se consideran los efectos que provocan en las líneas, ni se mencionan criterios para hacer que el flujo pulsante (que es el más problemático) en caso de presentarse evolucione a otro.

Esta consideración se hace porque debido a las características que muestra el flujo pulsante no es aplicable el método homogéneo que se consideró para llevar a cabo el análisis de flujo en dos fases.

RECOMENDACIONES

1.- Se recomienda que el ángulo de unión entre el ramal principal y la línea que converge al mismo sea de 45' para que las componentes de las fuerzas en la dirección X y Y sean iguales, esto es con el fin de disminuir las vibraciones en las tuberías.

2.- Se recomienda que los arreglos sean de la forma:



Ya que al pasar el flujo por el punto x se rompe el patrón de flujo existente debido al mezclado de las fases pudiendose considerar en adelante flujo homogéneo, para facilidad de análisis. Cuando la longitud l es muy grande el patrón de flujo se reestablece pero en condiciones menos críticas.

3.- Se recomienda que el número de pozos integrados a cada colector de mezcla sea de 5 a 7, dependiendo de la cantidad de flujo másico que aporte cada uno.

4.- Se recomienda que la estación reguladora de presión del sistema de control se localize a 100 metros antes del secador, ya que al ubicar la estación reguladora en un punto próximo a la planta hace más confiable la operación de la misma puesto que el recorrido de las señales de control y de aire

comprimido para el accionamiento de las válvulas es menor que al instalarse alejadas de la planta, donde se tiene el riesgo de que la señal no sea detectada oportunamente.

Evidentemente el análisis de cada uno de los puntos tratados puede hacerse más completo, pero dada la complejidad de algunos de ellos se analizaron solo de manera superficial.

Finalmente se puede concluir que el objetivo planteado en este trabajo se ha cumplido satisfactoriamente, dando un resultado positivo en la utilización de colectores para llevar a cabo una etapa de experimentación que permita obtener correlaciones para su diseño adecuado.

ANEXOS

ANEXO 1

CARACTERISTICAS DE LOS POZOS

Unicamente se proporcionan datos de los pozos que se utilizan en el análisis. Recordando que existe un número mayor de pozos que son los que producen vapor para alimentar la primer unidad turbogeneradora de Cerro Prieto II.

A.- DATOS DE LOS POZOS

Reporte de Mayo de 1981 de la Central Geotérmica de Cerro Prieto II para una unidad de 110 MW.

POZO	TEMPERATURA C	PRESION DE CABEZA DE POZO (kPa a)	FLUJO MASICO kg/h	ENTALPIA kJ/kg
M-127	274.3	5,886	250,000	1423.24
M-129	293.6	7,848	250,000	1611.60
M-147	297.9	8,338	250,000	1632.54
M-149	211.4	1,962	175,000	1405.24
M-169	256.2	4,414	250,000	1381.38
T-328	274.3	5,886	250,000	1423.24
T-348	274.3	5,886	250,000	1423.24
T-366	278.5	6,287	250,000	1444.17
T-386	274.3	5,886	250,000	1423.24
T-388	274.3	5,886	250,000	1423.24
T-364	274.3	5,886	250,000	1423.24

B.- CARACTERISTICAS DE LOS FLUJOS EN LOS SEPARADORES

Información recibida en el IIE en forma no oficial para modificaciones de diseño. 25 Mayo 1982

POZO	VAPOR kg/hr	AGUA kg/hr	MEZCLA kg/hr	ENTALPIA kJ/kg	PRESION bar abs.
M-127	86,100	146,500	232,600	1477.2	13.69
M-129	216,000	301,200	517,200	1474.8	14.11
M-147	297,000	249,600	546,700	1832.6	13.51
M-149	63,200	116,600	179,800	1447.5	13.42
M-169	23,300	204,900	228,200	1488.5	13.26
T-328	92,300	132,100	224,400	1561.4	13.80
T-348	187,400	250,700	438,100	1595.7	13.60
T-366	212,000	308,000	520,000	1515.3	13.70
T-386	85,900	159,500	245,000	1561.4	13.83
T-388	169,800	278,500	448,300	1494.8	13.76
T-364	176,900	335,300	312,200	1426.6	13.77

C.- PRESIONES DE OPERACION EN CERRO PRIETO II

Informe recibido en el IIE, correspondientes al resumen de 1984. Valores correspondientes a los pozos que alimentan la segunda unidad.

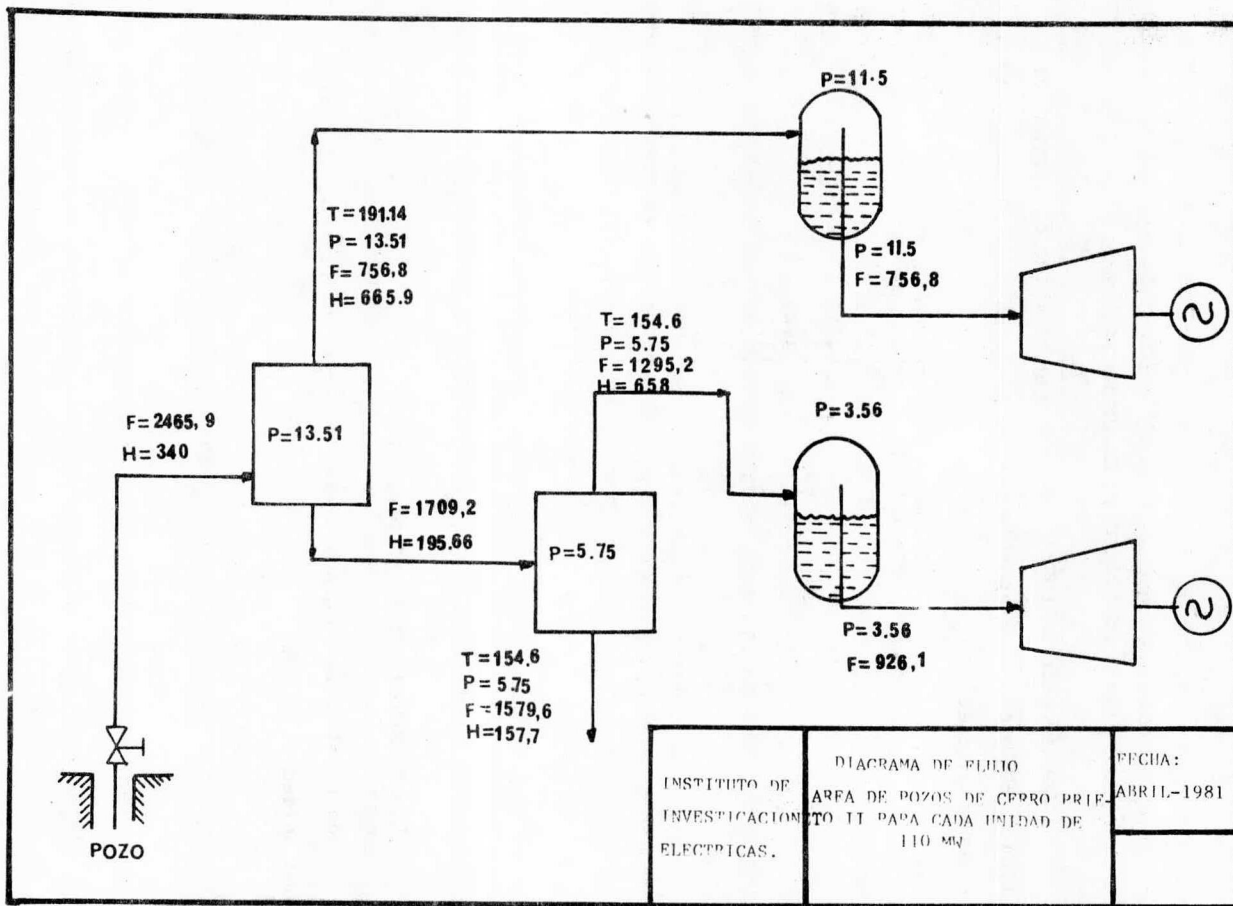
POZO	PRESION EN EL SEPARADOR DE BAJA (bar)	PRESION EN EL SEPARADOR DE ALTA (bar)
M-127	5.73	13.65
M-129	5.73	14.11
M-147	5.65	13.51
M-149	5.73	13.42
M-169	5.17	13.26
T-328	5.73	13.80
T-348	5.75	13.60
T-366	5.20	13.70
T-386	5.23	13.83
T-388	4.80	13.76
T-364	5.60	13.77

$$P_{\text{prom}} = 5.5$$

$$P_{\text{prom}} = 13.7$$

D.- CARACTERISTICAS DE OPERACION

Se muestra un diagrama de flujo de Cerro Prieto II para una unidad de 110 MW.



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS.	DIAGRAMA DE FLUJO AREA DE POZOS DE CERRO PRIETO TOTALES PARA CADA UNIDAD DE 110 MW	FECHA: ABRIL-1981

ANEXO 2

DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS Y DE LINEAS CONDUCTORAS DE VAPOR

LINEAS CONDUCTORAS DE VAPOR

A.- Pérdidas de presión en los vaporductos

La forma más sencilla de evaluar las pérdidas de presión que se presentan en tuberías es por medio de la ecuación de Darcy:

$$\Delta P = f \frac{L G^2}{D_1 2\rho_v}$$

En donde f corresponde al factor de fricción y se obtiene del diagrama de Moody. Para entrar al diagrama es necesario el número de Reynolds y la rugosidad superficial de la tubería.

El número de Reynolds se calcula de la siguiente forma:

$$Re = GD/\mu$$

Por otro lado la rugosidad se maneja como dato del problema, para obtener la relación adimensional ϵ/D ; con lo que se determina el factor de fricción. La densidad se calcula con el inverso del volumen específico del vapor a la presión de entrada de la turbina.

Finalmente se tiene G que corresponde a la densidad de flujo ($G = W/A$).

B.- Dimensionamiento de los vaporductos

En la determinación de los diámetros de los vaporductos se hacen dos consideraciones:

- a) La velocidad del vapor saturado en la tubería debe estar comprendido en un rango de 30 y 50 m/s. (velocidades recomendadas [2]).
- b) El área de las tuberías se determina por medio de la ecuación de continuidad.

Por lo tanto se tiene que:

$$Q = AV \quad W = \rho VA = Q\rho$$

En donde el área para una sección circular es:

$$A = \pi D^2 / 4$$

Sustituyendo A en la ecuación de continuidad y despejando el diámetro se tiene:

$$D = \sqrt{\frac{4 Q}{V_{\text{rec.}}}}$$

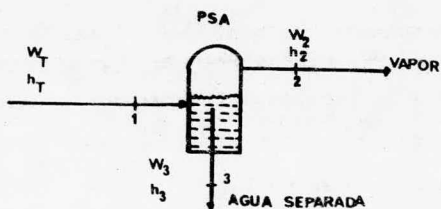
que corresponde al diámetro que deben tener las líneas conductoras de vapor.

SEPARADORES

C.- Propiedades termodinámicas del vapor y agua separada

El análisis se realiza en el separador tomando en cuenta un ciclo con dos etapas de evaporación [2].

Analizando un separador primario se tiene:



Cómo datos se necesitan:

- W_T = Flujo total de la mezcla [kg/h]
 h_T = Entalpía de la mezcla a la
 entrada del equipo [kJ/kg]
 P_{SA} = Presión de separación [bar abs]

- La calidad del vapor dentro del separador se determina con la siguiente expresión:

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

en donde:

$$h_2 = h_g \quad h_3 = h_f$$

que se obtienen de las tablas termodinámicas de propiedades del agua a la presión de separación P_{SA} .

- Flujo másico de vapor [kg/s]

$$W_V = W_1 X$$

- Flujo másico del líquido [kg/s]

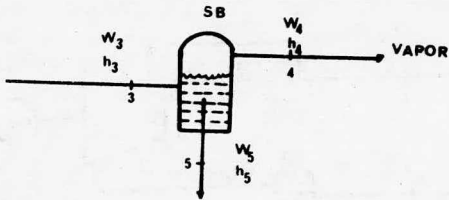
$$W_L = W_1 (1-X)$$

-Entalpía del vapor y del agua separada.

h_G obtenida a la presión del separador primario.

h_f obtenida a la presión P_{SA}

Separador secundario



-Entalpias del vapor

$h_4 = h_G$. Obtenida con la presión P_{SB}

- Entalpia de agua separada

$h_5 = h_f$. Obtenida con la presión P_{SB}

La obtención de los flujos máxicos es por medio de un balance de masa y energía en el separador secundario:

$$W_3 = W_4 + W_5$$

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

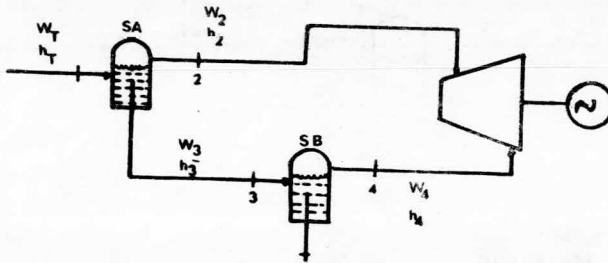
despejando W_5 se obtiene el flujo de agua separada:

$$W_5 = W_3 \frac{h_3 - h_4}{h_5 - h_4}$$

finalmente el flujo de vapor es:

$$W_4 = W_3 - W_5$$

el arreglo del balance es:



D.- Dimensionamiento de los separadores

Como datos para iniciar el cálculo se necesitan:

X = calidad del vapor en el separador

W_2 = flujo másico de vapor

W_3 = flujo másico de líquido

A la presión P_{SA} se obtienen las siguientes propiedades de la fase líquida y gaseosa h_f , h_g , v_f , v_g .

- Primero se calculan los flujos volumétricos del vapor y del agua [m/s].

$$Q_V = v_G W_1$$

$$Q_L = v_L W_2$$

- Area de la tubería de entrada:

$$A = Q_V / V_{rec}$$

- Diámetro interno de la tubería de entrada:

$$D = \sqrt{4A / \pi}$$

Una vez que se obtiene el diámetro se ajusta a un valor comercial D_c y se verifica que la velocidad real quede dentro del rango de velocidades recomendadas. En donde la velocidad real del vapor a la entrada del separador es:

$$V_{real} = 4Q_V / D^2 \pi$$

El rango en el cual queda comprendida la velocidad recomendada para el vapor dentro del separador es de 25 a 40 m/s [3].

El dimensionamiento de los separadores incluye otros factores a calcular, pero no se consideran por estar fuera del alcance del estudio.

ANEXO 3

CALCULO DEL DIMENSIONAMIENTO DE LAS LINEAS CONDUCTORAS DE VAPOR Y EQUIPOS

A.- ALTERNATIVA A

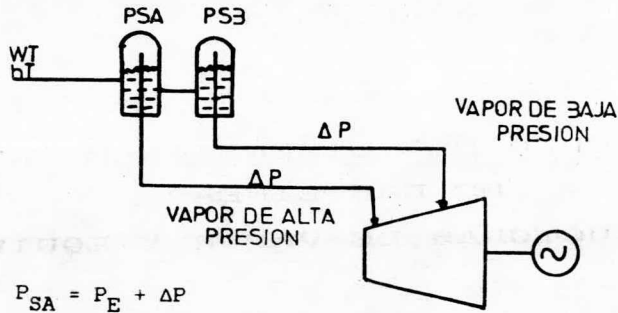
A.1 Líneas conductoras de vapor

El dimensionamiento de las líneas de vapor es en base a las condiciones de operación de la turbina, siendo los datos de entrada de la misma:

$$P_{ET} = 11.3 \text{ bar}$$

$$W_V = 750 \text{ ton/h}$$

Considerando que el análisis es de la turbina hacia atrás y siendo el separador el siguiente equipo del que se requiere conocer la presión se establece:



con los valores de las longitudes establecidas en cada arreglo y con los datos de la turbina, se calculan las pérdidas de presión de acuerdo a lo establecido en el anexo 2-A y 2-B, obteniéndose los siguientes resultados:

SEPARADOR PRIMARIO

L = 465
 D = 1.025 m
 D_{nom} = 40 pg.
 V_{rec} = 38.2 m/s
 G = 254 kg/sm²
 R_e = 1.58 x 10⁷

SEPARADOR SECUNDARIO

L = 465
 D = 0.61 m
 D_{nom} = 26 pg.
 V_{rec} = 37 m/s
 G = 109.6 kg/sm²
 R_e = 4.7 x 10⁶

$$\epsilon/D = 0.00097$$

$$\epsilon/D = 0.0057$$

$$f = 0.012$$

$$f = 0.024$$

$$\Delta P_1 = 26,418.7 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_2 = 35,612 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_1 = 0.2642 \text{ bar}$$

$$\Delta P_2 = 0.356 \text{ bar}$$

La presión del separador primario es:

$$P_{SA} = P_{ET} + \Delta P_1 = 12 \text{ bar}$$

Presión del separador secundario:

$$P_{SB} = P_{ET} + \Delta P_2 = 4 \text{ bar}$$

Con la presión de separación se calcula la cantidad real de vapor que se obtiene, de acuerdo al flujo total entregado por el colector (W_T).

A.2 Separadores

En el diseño de los separadores se considera que el total de la mezcla NO alimenta a un separador primario único, sino que se instala una planta de evaporación con un número de separadores previamente establecido, los que manejan un porcentaje del total de la mezcla.

Para la alternativa A se seleccionan 5 separadores primarios en el que cada uno maneja el 25% del total de la mezcla quedando uno de respaldo para ser usado en caso de que falle alguno o requiera mantenimiento.

Los resultados de la mezcla total que se obtiene del colector son [ver cap. IV.1.3.1].

$$W_T = 2,425,000 \text{ kg/h.}$$

$$h_T = 1428.7 \text{ kJ/kg}$$

$$P_{SA} = 12 \text{ bar abs.}$$

El flujo que maneja un separador es:

$$W = 606,250 \text{ kg/h}$$

los flujos resultantes son [anexo 2-C]:

$$X = 31.7\%$$

$$W_2 = 192,560 \text{ kg/h}$$

$$W_3 = 413,700 \text{ kg/h}$$

W_2 es el flujo de vapor que entrega un separador, si se considera que son cuatro, el flujo total es:

$$W_{2T} = 770,000 \text{ kg/h}$$

Con lo que se asegura el suministro de vapor a la turbina para la que se tiene de dato un flujo de 750,000 kg/h.

Para los separadores se tiene:

Area de entrada = 0.268 m²

Diámetro de entrada = 24 pg.

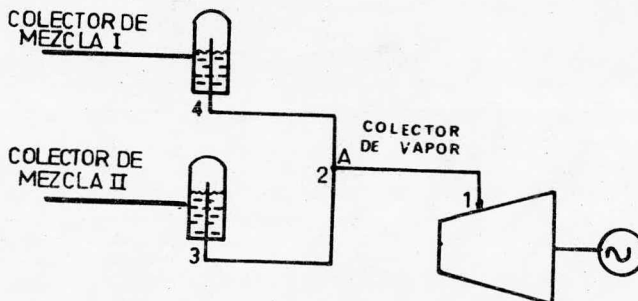
Velocidad real = 33.3 m/s

Por lo tanto se requieren 5 separadores de alta presión de diámetro nominal de 24 pulgadas.

ALTERNATIVA B:

Líneas conductoras de vapor:

El arreglo de los vaporductos es de la siguiente forma, mostrandose unicamente las líneas de alta presión ya que las de baja son paralelas a las primeras.



Primero se calculan las pérdidas de presión de acuerdo a lo establecido en el anexo 2-A.

LINEA DE ALTA PRESION

$$\begin{aligned}L &= 560 \\D &= 1 \text{ m} \\d_{\text{nom}} &= 40 \text{ in} \\V &= 38.5 \text{ m/s} \\G &= 255.5 \text{ kg/sm}^2 \\R_e &= 1.6 \times 10^7 \\\epsilon/D &= 0.00097 \\f &= 0.12 \\\Delta P_{1-2} &= 32,246 \text{ Pa} \\\Delta P_{1-2} &= 0.322 \text{ bar}\end{aligned}$$

LINEA DE BAJA PRESION.

$$\begin{aligned}L &= 560 \\D &= 0.574 \text{ m} \\D_{\text{nom}} &= 24 \text{ in} \\V &= 45 \text{ m/s} \\G &= 133.57 \text{ kg/sm}^2 \\R_e &= 5.2 \times 10^8 \\\epsilon/D &= 0.0017 \\f &= 0.23 \\\Delta P_{1-2} &= 67,386 \text{ Pa} \\\Delta P_{1-2} &= 0.673 \text{ bar}\end{aligned}$$

La presión en A es:

$$P_A = 11.3 + 0.322 = 11.62 \text{ bar}$$

Presión en B (línea de baja presión):

$$P_B = 3.5 + 0.673 = 4.17 \text{ bar}$$

Para el Colector I se tiene:

SEPARADOR PRIMARIO

$$\begin{aligned}L &= 190 \text{ m} \\D &= 0.7366 \text{ m} \\D_{\text{nom}} &= 30 \text{ pg.} \\V &= 39.3 \text{ m/s} \\G &= 260.7 \text{ kg/sm}^2 \\R_e &= 1.17 \times 10^7 \\e/D &= 0.0035 \\f &= 0.022 \\\Delta P_{2-3} &= 29,044 \text{ Pa} \\\Delta P_{2-3} &= 0.29 \text{ bar}\end{aligned}$$

SEPARADOR SECUNDARIO

$$\begin{aligned}L &= 190 \text{ m} \\D &= 0.4286 \text{ m} \\D_{\text{nom}} &= 18 \text{ pg.} \\V &= 41.3 \text{ m/s} \\G &= 122.6 \text{ kg/sm}^2 \\R_e &= 3.57 \times 10^6 \\e/D &= 0.0023 \\f &= 0.023 \\\Delta P_{2-3} &= 25,840 \text{ Pa} \\\Delta P_{2-3} &= 0.258 \text{ bar}\end{aligned}$$

La presión del separador primario es:

$$P_3 = P_{SA} = 11.62 + 0.29 = 11.9 \text{ bar}$$

Presión en el separador secundario:

$$P_{3'} = P_{SB} = 4.17 + 0.258 = 4.5 \text{ bar}$$

Para el Colector II se tiene:

SEPARADOR PRIMARIO

SEPARADOR SECUNDARIO

$$L = 300 \text{ m}$$

$$L = 300 \text{ m}$$

$$D = 0.6858 \text{ m}$$

$$D = 0.4286 \text{ m}$$

$$D_{\text{nom}} = 28 \text{ pg}$$

$$D_{\text{nom}} = 18 \text{ pg}$$

$$V = 40.4 \text{ m/s}$$

$$V = 39.5 \text{ m/s}$$

$$G = 270 \text{ kg/sm}^2$$

$$G = 117.4 \text{ kg/s-m}^2$$

$$R_e = 1.13 \times 10^7$$

$$R_e = 3.41 \times 10^8$$

$$\epsilon/D = 0.00146$$

$$\epsilon/D = 0.024$$

$$f = 0.022$$

$$f = 0.024$$

$$\Delta P_{2-4} = 52,777 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{2'-4'} = 39,416 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{2-4} = 0.527 \text{ bar}$$

$$\Delta P_{2'-4'} = 0.394 \text{ bar}$$

Presión en el separador primario

$$P_4 = P_{SB} = 11.62 + 0.527 = 12.2 \quad 12.5 \text{ bar}$$

Presión en el separador secundario

$$P_{4'} = P_{SB} = 4.17 + 0.395 = 4.56 \quad 5 \text{ bar}$$

B.2.- SEPARADORES

En la alternativa B se propone utilizar 4 separadores con capacidad cada uno para manejar el 50 % del total de la mezcla de cada colector. Existen dos colectores por lo tanto hay dos separadores en cada uno.

Colector I:

El flujo y entalpia total del colector I son:

$$W_T = 1,250,000 \text{ kg/h}$$

$$h_T = 1447,11 \text{ kJ/kg}$$

$$P_{SA} = 12 \text{ bar}$$

- El flujo correspondiente a un separador es:

$$W = 625,000 \text{ kg/h}$$

- Los flujos de vapor y agua séparada son: [anexo 2-C]

$$W_2 = 204,000 \text{ kg/h}$$

$$W_3 = 421,000 \text{ kg/h}$$

- El flujo total del colector I es:

$$W_{2T} = 408,000 \text{ kg/h}$$

- Características del separador: [anexo 2-D]

$$A = 0.257 \text{ m}^2$$

$$D_{\text{nom}} = 24 \text{ pg}$$

$$V_{\text{real}} = 32.25 \text{ m/s}$$

Colector II :

- Flujo total del colector II

$$\dot{W}_T = 1,175,000 \text{ kg/h}$$

$$h_T = 1418.26 \text{ kJ/kg}$$

$$P_{SA} = 12.5 \text{ bar}$$

- Flujo de un separador:

$$W = 587,500 \text{ kg/h}$$

- Flujo de agua separada y vapor [anexo 2-C]

$$X = 30.54 \%$$

$$\dot{W}_2 = 182,000 \text{ kg/h}$$

$$\dot{W}_3 = 405,500 \text{ kg/h}$$

- Flujo total de vapor del colector II:

$$\dot{W}_{2T} = 364,000 \text{ kg/h}$$

- Características del separador

$$A = 0.23 \text{ m}^2$$

$$D_{\text{nom}} = 22 \text{ pg}$$

$$V_{\text{real}} = 35.3 \text{ m/s}$$

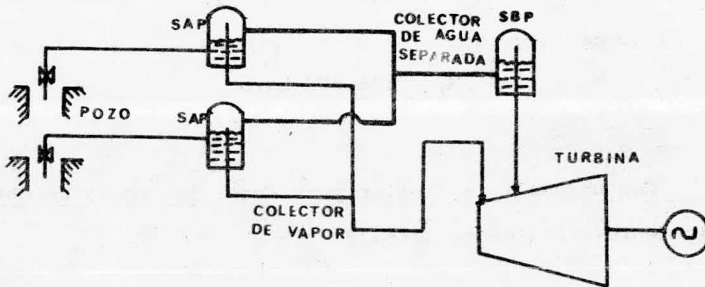
Para comprobar que se genera la cantidad suficiente de vapor para alimentar la turbina, se suman los flujos másicos de vapor de ambos colectores, teniendo como resultado:

$$W_v = 772,000 \text{ kg/h}$$

Con lo que se asegura el suministro de vapor a la turbina.

ALTERNATIVA C:

La tercer alternativa tiene un arreglo de la siguiente forma:



C.1 Lineas conductoras de vapor a alta presión:

En esta alternativa existe un separador primario por cada pozo, por lo que se realiza un balance en cada uno de ellos. El balance es el igual para todo los pozos, por lo que solo se desarrolla para uno de ellos y los resultados de los restantes se muestran en una tabla.

POZO 328

Datos: Presión de separación = 13.8 bar abs
 Entalpía del flujo = 1561.4 kJ/kg
 Flujo másico total = 250,000 kg/h

-Calidad

$$X = 37.4 \%$$

-Flujo másico de vapor

$$W_2 = W_T X = 93,500 \text{ kg/h}$$

- Flujo del liquido

$$W_3 = (1-X) W_T = 156,500 \text{ kg/h}$$

Con un análisis similar para todos los pozos se obtiene la siguiente tabla de resultados:

POZO	P _{sep} (bar abs)	h _L kJ/kg	h _V kJ/kg	W _L kg/h	W _L kg/h
328	13.80	830.1	2827.8	156,500	93,500
348	13.60	822.5	2786.6	152,000	98,000
366	13.70	826.8	2787.2	162,000	88,000
364	13.76	827.0	2787.2	174,000	76,000
386	13.80	830.1	2787.8	156,500	93,000
127	13.65	825.7	2787.0	167,000	83,000
147	13.50	822.4	2786.5	122,000	128,000
169	13.25	818.6	2786.0	165,000	85,000
388	13.75	827.0	2787.0	165,000	85,000
129	14.10	830.1	2787.8	155,000	95,000
149	13.42	825.7	2787.0	170,000	80,000

C.2 Separadores:

En el diseño de los separadores se hacen las siguientes consideraciones:

- a) Todos los separadores son iguales.
- b) Se dimensionan en base a una presión de operación promedio.
- c) Todos manejan la misma cantidad de flujo.

Datos: $W_T = 250,000 \text{ kg/h}$ (Anexo 1-A)
 $P_{SA} = 13.7 \text{ bar}$ (Anexo 1-C)
 $h = 1543.25 \text{ kJ/kg}$ (Anexo 1-B)
 $X = 40 \%$

-Flujos resultantes

$$W_2 = 100,000 \text{ kg/h}$$

$$W_3 = 150,000 \text{ kg/h}$$

- Características del separador

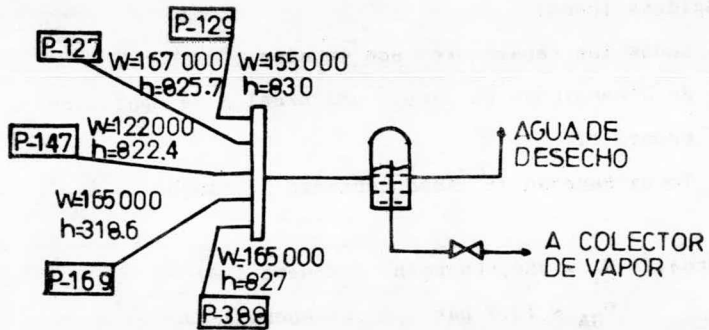
$$A = 0.122 \text{ m}^2$$

$$D_{\text{nom}} = 16 \text{ pg}$$

$$V_{\text{real}} = 30.7 \text{ m/s}$$

C.3 Líneas conductoras de agua separada.

Para el cabezal I se tiene:



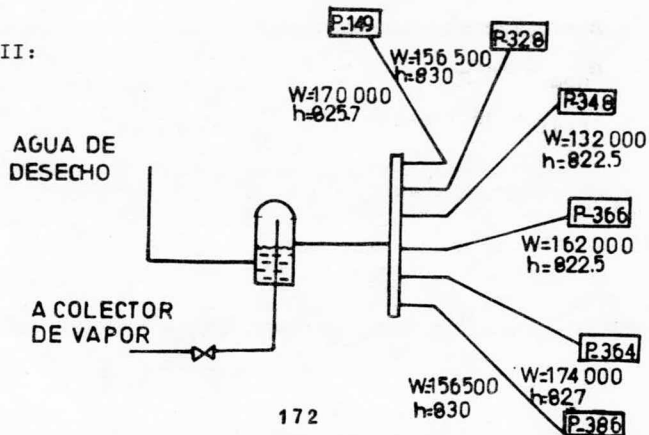
El flujo total que entra al separador secundario se obtiene efectuando un balance de masa.

$$W_I = 774,000 \text{ kg/h}$$

La entalpía se obtiene de un balance de energía:

$$h = 824.84 \text{ kJ/kg}$$

CABEZAL II:



El flujo y la entalpia resultante son:

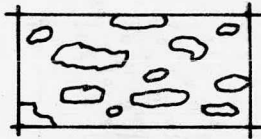
$$W_{II} = 970,800 \text{ kg/h}$$

$$h_{II} = 827 \text{ kJ/kg}$$

ANEXO 4

GENERALIDADES SOBRE EL DIMENSIONAMIENTO DE LINEAS CONDUCTORAS DE MEZCLA BIFASICA

Analizando un volumen de control:



- El flujo másico total es la cantidad de masa que pasa en el ducto por unidad de tiempo y es igual a la suma de los flujos másicos de las fases [30].

$$W_T = W_L + W_V \quad (1)$$

- La calidad de la mezcla es la relación entre el flujo másico de la fase gaseosa y el flujo másico total.

$$X = W_V/W_T \quad (2)$$

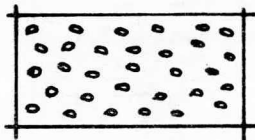
-Fracción volumétrica, si se considera una mezcla en dos fases la fracción volumétrica del líquido, o sea la fracción de volumen de control ocupada por el líquido es:

$$R_L = V_L/V_T \quad (3)$$

y para el vapor es:

$$R_V = 1-R_L \quad (4)$$

- Fracción volumétrica superficial (mezcla homogénea) [Anexo 6]. Suponiendo que las burbujas de vapor se distribuyen en forma homogénea en el volumen de control se tiene:



definiendose la fracción volumétrica superficial del líquido y del vapor de la siguiente forma:

$$\lambda_L = Q_L/Q_T \quad (5)$$

$$\lambda_V = 1-\lambda_L \quad (6)$$

- Volúmen específico de la mezcla homogénea:

$$v_H = Xv_V + (1-X)v_L \quad (7)$$

- Densidad de la mezcla:

$$\rho = 1/v_H \quad (8)$$

- Velocidad superficial del líquido y vapor:

$$v_{SL} = Q_L/A \quad (9)$$

$$v_{SV} = Q_V/A \quad (10)$$

Siendo por lo tanto la velocidad de la mezcla homogénea:

$$v_H = v_{SL} + v_{SV} \quad (11)$$

Y a su vez

$$v_{SL} = \frac{Q_L}{A} = \frac{(1-X) W_T v_L}{A_L} \quad (9')$$

$$v_{SV} = \frac{Q_V}{A} = \frac{X W_T v_V}{A_V} \quad (10')$$

Sustituyendo (9) y (10) en (11):

$$v_H = \frac{(1-X) W_T v_L + X W_T v_V}{A}$$
$$v_H = \frac{W_T}{A} \left[(1-X) v_L + X v_V \right] \quad (12)$$

Sustituyendo (7) en (12)

$$v_H = (W_T/A) v_H \quad (13)$$

Y si además se considera la densidad de flujo másico, se

obtiene finalmente la velocidad de la mezcla homogénea:

$$G = W / A$$

$$V_H = G_T v_H$$

Considerando las velocidades recomendadas por Crane se tiene:

$$X = 0 \quad V_H = 3 \text{ m/s} \quad (\text{agua pura})$$

$$X = 1 \quad V_H = 30 \text{ m/s} \quad (\text{solo vapor})$$

que son las velocidades recomendadas para tener pérdidas de presión razonables.

Sustituyendo en la ecuación (9) y(10) los rangos de V_H

$$3 = (1-X)W_T v_L / A_L \quad \text{Vel. sup. del líquido}$$

$$30 = XW_T v_V / A_V \quad \text{Vel.sup. del vapor}$$

Despejando el área en ambas ecuaciones:

$$A_L = \frac{(1-X) W_T v_L}{3} \quad A_V = \frac{X W_T v_V}{30}$$

Siendo el área total:

$$A_T = A_L + A_V$$

Y finalmente el diámetro de los ductos que conducen la mezcla homogénea es:

$$D = \sqrt{\frac{4 A}{\pi}}$$

Por otra parte es importante conocer el comportamiento de la mezcla homogénea en función de la calidad. Utilizando la ec. (12) se determina V_H con diferentes calidades para obtener la gráfica $V_H - X$.

Se obtienen tres curvas para diferentes condiciones:

La primera corresponde a:

$$P = 6 \text{ bar}$$

$$W = 250,000 \text{ Kg/hr}$$

la segunda a:

$$P = 12 \text{ bar}$$

$$W = 250,000 \text{ Kg/hr}$$

$$P = 18 \text{ bar}$$

la tercera:

$$P = 18 \text{ bar}$$

$$W = 250,000 \text{ Kg/hr}$$

GRAPICA CALIDAD VA VELOCIDAD DE LA MEZCLA

v_B
(m/seg)

30

20

10

3

0

10

20

30

40

50

60

70

80

90

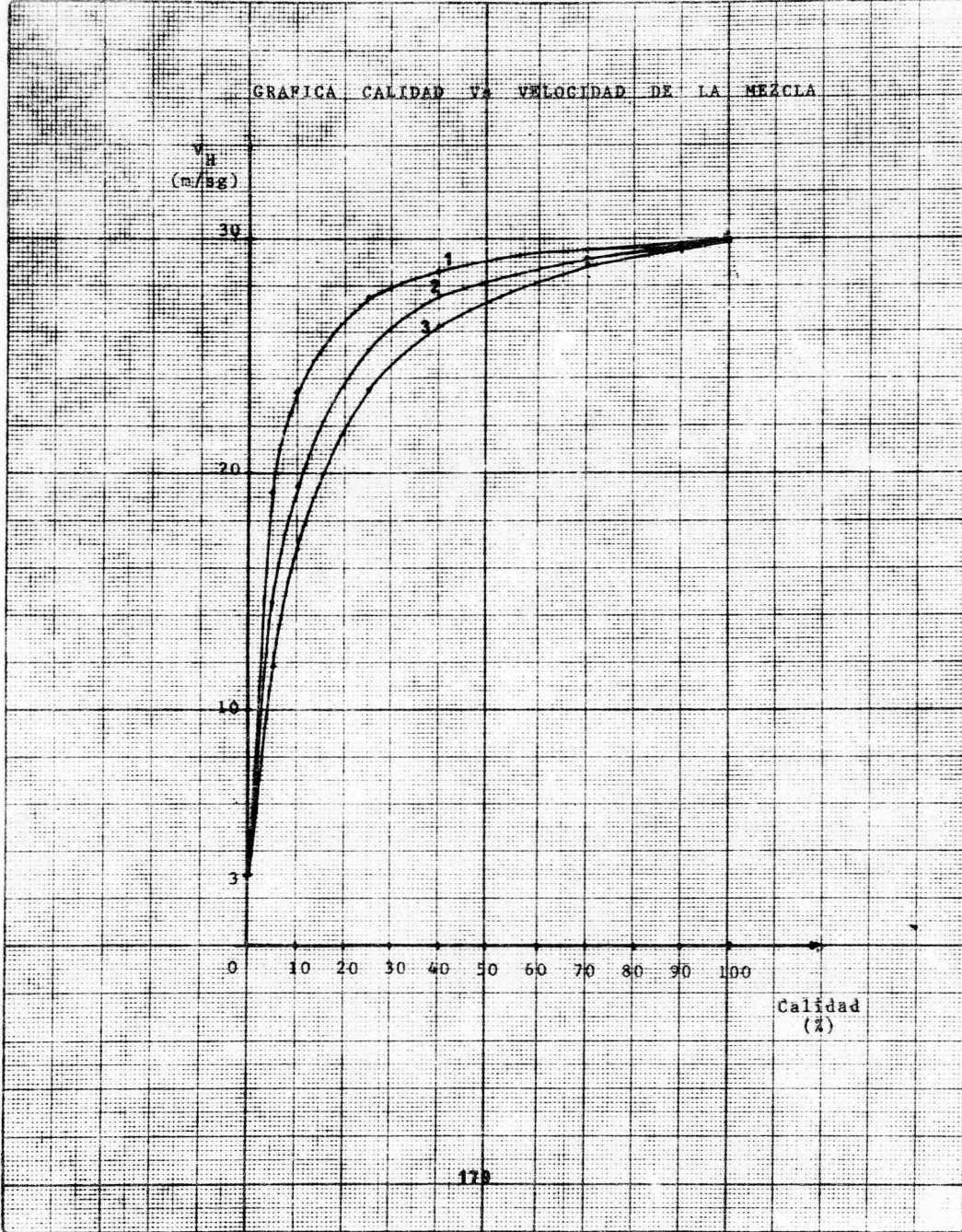
100

Calidad
(%)

1

2

3



ANEXO 5

PERDIDAS DE PRESION EN TUBERIAS HORIZONTALES CONDUCTORAS DE FLUJO BIFASICO

METODO DE DUKLER II:

Las pérdidas de presión total dada por el método de Dukler

II son:

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{\frac{f_{TP}}{D} \frac{G_T^2}{2 \rho_{TP}}}{1 - \frac{G_T^2}{\rho_{TP}} \left[\rho_{LV} \frac{dR_L}{dP} + R_V \frac{d\rho_V}{dP} \right]}$$

En donde:

- El numerador considera las pérdidas de presión debidas a la fricción, por metro de longitud [kPa/m].

- El denominador evalua las pérdidas de presión por cambios de momentum.

$$M = mV \quad \text{o} \quad F = ma$$

Lo anterior significa que las caídas de presión están en función de los cambios de aceleración en las fases. En donde el rango de dichos cambios es de 0 a 1. Cuando las variaciones de momentum son cero, significa que las pérdidas de presión se deben unicamente a la fricción.

El método de Dukler II consiste en evaluar los siguientes parámetros:

f_{TP} = factor de fricción de las dos fases.

ρ_{TP} = densidad de las dos fases.

R_L = fracción volumétrica del líquido.

y considera como datos de entrada

Flujo másico total	W_T	Kg/seg
Calidad	X	%
Presión	P	N/m
Diámetro interno	D	m
Rugosidad absoluta		m

- Densidad de la mezcla bifásica

$$\rho_{TP} = \rho_{NS}/\beta$$

- Parámetro de Dukler

$$\beta = \frac{\rho_L \lambda_L^2 / R_L + \rho_V \lambda_V^2 / R_V}{\rho_{NS}}$$

- Densidad de la mezcla homogénea

$$\rho_{NS} = \rho_L \lambda_L + \rho_V \lambda_V$$

- Fracción volumétrica superficial del vapor

$$\lambda_V = X \rho_L / (X \rho_L + (1-X) \rho_V)$$

- Fracción volumétrica superficial del líquido

$$\lambda_L = 1 - \lambda_V$$

- Densidad de flujo másico

$$G_T = \dot{W}_T / A$$

- Velocidad superficial del líquido

$$V_{SL} = \frac{(1-X) G_T}{\rho_L}$$

- Velocidad superficial del vapor

$$V_{SV} = X G_T / \rho_V$$

- Velocidad de la mezcla homogénea

$$V_M = V_{SL} + V_{SV}$$

- Número de Froude de la mezcla homogénea

$$Fr = V_m^2 / gD$$

- Viscosidad de la mezcla

$$\mu_{TP} = R_L \mu_L + (1-R_L) \mu_V$$

CALCULO DE LA FRACCION VOLUMETRICA DEL LIQUIDO (HUGHMARK)

- Cálculo del número de Reynolds de la mezcla

$$Re_{TP} = G_T D / \mu_{TP}$$

- Cálculo del factor de Hughmark

$$\delta = Re_{TP}^{1/8} Fr^{1/8} \lambda_L^{1/4}$$

- Cálculo del parámetro de Bankoff

$$\kappa = -0.16367 + 0.31037\delta - 0.03525\delta^2 + 0.001366\delta^3$$

$$\kappa = 0.75545 + 0.003585\delta - 0.1436 \times 10^{-4} \delta^2$$

- Cálculo de la fracción volumétrica del líquido

$$R_L = 1 - (1 - \lambda_L) \kappa$$

CALCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN (DUKLER)

- Número de Reynolds de la mezcla homogénea

$$Re_{NS} = G_T D / \mu_{NS}$$

- Viscosidad de la mezcla homogénea

$$\mu_{HS} = \mu_L \lambda_L + \mu_V \lambda_V$$

- Número de Reynolds de la mezcla

$$Re_{eTP} = \beta Re_{NS}$$

- Factor de fricción de la ecuación de Colebrook

$$f_0 = \left[2 \log \frac{Re_{TP}}{4.5223 \log Re_{eTP} - 3.8215} \right]^{-2}$$

- Factor de fricción de la mezcla bifásica

$$f_{TP} = f_0 \alpha (\lambda_L)$$

- Factor de corrección del factor de fricción

$$\alpha (\lambda_L) = 1.0 - m \lambda_L / \xi$$

$$\xi = 1.281 + 0.478 m \lambda_L + 0.444 (m \lambda_L)^2 + 0.094 (m \lambda_L)^3 + 0.00843 (m \lambda_L)^4$$

ANEXO 6

MODELO HOMOGENEO

El modelo de flujo homogéneo se aplica únicamente a situaciones donde no hay variación rápida de los parámetros de flujo (como la presión) y en donde además existe equilibrio termodinámico [30].

La idea del modelo homogéneo consiste en reemplazar al fluido bifásico por un fluido compresible monofásico equivalente, en donde las propiedades del fluido equivalente se calculan en función de las propiedades de cada una de las fases.

Las propiedades del fluido bifásico se manejan como propiedades modificadas por la calidad, se toman como un promedio y no necesariamente las de alguna de las fases. Las propiedades que se modifican son la velocidad, la temperatura, la densidad y la propiedad de transporte (viscosidad).

Los parámetros que intervienen en el modelo homogéneo son útiles en la determinación de las pérdidas de presión.

Considerando un flujo homogéneo, matemáticamente las pérdidas se definen de la siguiente forma:

$$\Delta P = f_H \frac{L_{eq}}{D} \frac{G_T^2}{2 \rho_H}$$

El término $(f_H L_{eq}/D)$ se sustituye por un factor de fricción K de la mezcla homogénea:

$$\Delta P = K \frac{G_T^2}{2 \rho_H}$$

- Densidad de la mezcla bifásica

$$\rho_H = 1 / v_H$$

- Volúmen específico de la mezcla bifásica

$$v = Xv_V + (1-X)v_L$$

- El factor de fricción de la mezcla esta en función del número de Reynolds de la mezcla:

$$f_H = f(Re_H)$$

y se evalúan por medio de la ec. de Colebrook.

$$\frac{1}{f_H} = -2 \log_{10} \left[\frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f_H}} + \frac{2.51}{7.4} \right]$$

- Número de Reynolds de la mezcla homogénea

$$\text{Re}_H = G_T D / \mu_H$$

- Viscosidad dinámica de la mezcla

$$\mu_H = \lambda_L \mu_L + \lambda_V \mu_V$$

en donde λ_L es la fracción volumétrica superficial

$$\lambda_L = Q_L / (Q_L + W_V)$$

$$Q = W / \rho$$

- Flujo másico del líquido y del vapor

$$W_L = (1-X) W_T$$

$$W_V = X W_T$$

$$\rho_L = \frac{(1-X) \rho_V}{(1-X) \rho_V + X \rho_L}$$

- Fracción volumétrica superficial del vapor

$$\lambda = 1 - \lambda_L$$

- Densidad de flujo másico

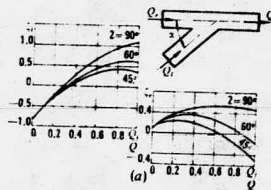
$$G_T = W_T / A$$

Con lo que finalmente se evalúa la pérdida de presión.

ANEXO 7

COEFICIENTES DE FRICCIÓN K

Los valores se toman de la grafica que a continuación se muestra, teniendo como datos de entrada el ángulo formado entre el ramal principal y línea que converge y la relación de flujo Q_T/Q_L .



ALTERNATIVA A

TRAMO	ANGULO (grados)	Q_L ton/hr	Q_T ton/hr	Q_L/Q_T (-)	K
129 328	45	250	500	0.5	0.25
127 1	45	250	750	0.33	-0.08
149 2	30	175	925	0.19	-0.40
348 3	45	250	1175	0.21	-0.30
147 4	45	250	1425	0.17	-0.40
169 5	45	250	1675	0.15	-0.56
364 386	45	250	500	0.50	0.25
366 7	45	500	750	0.66	0.40
8 6	45	750	2425	0.31	-0.08
388 9	45	250	2675	0.09	-0.60

ALTERNATIVA B

TRAMO	ANGULO (grados)	Q_L ton/hr	Q_T ton/hr	Q_L/Q_T (-)	K
328 348	45	250	500	0.5	0.25
129 1	45	250	750	0.33	-0.08
149 2	30	175	925	0.19	-0.40
127 3	45	250	1175	0.21	-0.30
147 4	45	250	1425	0.17	-0.40
364 386	45	250	500	0.50	0.25
366 6	45	250	750	0.33	-0.08
388 7	45	250	1000	0.25	-0.20
169 8	45	250	1250	0.20	-0.30

* CLAUDIO MATAIX. MECANICA DE FLUIDOS.

ANEXO 8

INCRUSTACIONES

Información proporcionada por C.F.E. del promedio de componentes químicos del agua separada de Cerro Prieto II.

COMPONENTES		CONTENIDO
Litio	Li	29
Sodio	Na	9,286
Potasio	K	2,216
Calcio	Ca	393
Boro	B	23
Cloruros	Cl	18,045
Silice	SiO ₂	1,260
Sólidos totales		----- 31,925

TABLA I

Con ayuda del diagrama ppm-Temperatura es posible determinar el contenido de sílice en solución de cada pozo. La siguiente tabla muestra la cantidad de sílice que existe en el fluido geotérmico al ser extraído del pozo.

POZO	TEMPERATURA	SILICE EN SOLUCION
M-127	274.29	1500
M-129	293.62	1580
M-147	297.86	1585
M-149	211.38	1380
M-169	256.23	1480
T-328	274.29	1500
T-348	274.29	1500
T-366	278.51	1520
T-386	274.29	1500
T-388	274.29	1500
T-364	274.29	1500

SEPARADORES

Para determinar el contenido de sílice que existe en los separadores se utiliza de nuevo el diagrama ppm-temperatura, usando la presión de separación correspondiente.

ALTERNATIVA A:

$$P_{SEP} = 12 \text{ bar}$$

$$T_{SAT} = 188 \text{ C}$$

SILICE EN:

SOLUCION = 820 ppm

SUSPENSION = 440 ppm

En el reporte proporcionado por CFE (tabla I) se observa que el porcentaje de sílice en el agua separada es de 1260 ppm. Por lo tanto existen 820 ppm en estado de solución y 440 en estado de suspensión que son las que fácilmente pueden precipitarse.

El flujo volumétrico en el que se encuentra distribuida la sílice se determina por medio de la expresión:

$$Q = \frac{W}{\rho}$$

La densidad se obtiene a la presión del separador y el flujo corresponde al que manejan los separadores.

El gasto que se obtiene para la primer alternativa es de 19 m³/sg.

ALTERNATIVA B:

COLECTOR I:

P_{SEP} = 12.5 bar

T_{SAT} = 189.8 C

SILICE EN:

SOLUCION = 830 ppm

SUSPENSION = 430 ppm

GASTO = 17.5 m³/sg

COLECTOR II:

P_{SEP} = 12.0 bar

T_{SAT} = 187.96 C

SILICE EN :

SOLUCION = 820 ppm

SUSPENSION = 440 ppm

GASTO = 19 m³/sg

ALTERNATIVA C:

Se considera que todos los separadores a pie de pozo operan a la misma presión.

$P_{SEP} = 13.5 \text{ bar}$

$T_{SAT} = 193.35 \text{ C}$

SILICE EN:

SOLUCION = 840 ppm

SUSPENSION = 420 ppm

GASTO = $6.5 \text{ m}^3/\text{sg}$

ANEXO 9

PARAMETROS ECONOMICOS

El procedimiento económico establecido para la elaboración de evaluaciones económicas es el método de valor presente.

VALOR PRESENTE: es un concepto que relaciona gastos de dinero que ocurrirán en diferentes fechas en el futuro con una cantidad total equivalente a una fecha específica presente.

FACTOR DE VALOR PRESENTE (FVP): el concepto involucra gastos de dinero que ocurrirán en el futuro transformándolos a una cantidad equivalente de dinero a una fecha actual determinada, cada cantidad se ve reducida por un factor de valor presente, que depende del interés anual y del periodo de

tiempo entre los puntos de referencia, éste factor de valor presente para una cantidad única se define de la siguiente manera [34].

$$F.V.P. = \frac{1}{(1 + i)^n}$$

i = interés anual
n = núm. de años.

SERIE UNIFORME A: es una serie de cantidades periódicas e iguales de dinero. A se expresa en pesos por períodos de interés y es importante observar que para que una serie sea representada por el símbolo A, debe ser uniforme y se debe extender a través de periodos consecutivos.

DATOS DE COSTOS:

Los datos que se muestran a continuación se tomaron del anexo del estudio de factibilidad de rediseño de líneas de agua separada para la unidad 5 de Cerro Prieto II [29].

1.- Tasa de interés y descuento: el término tasa de rendimiento se maneja como tasa de descuento. Aún cuando no sea correcto se toma el mismo valor para los cálculos y los resultados son válidos para fines de comparación.

Tasa de interés = 7%

Tasa de rendimiento = 12 %

2.- Costos de Construcción: La información se obtuvo de los registros de superintendencia de construcción para líneas de 8,10 y 12 pulgadas respectivamente, observándose una variación lineal entre diámetros y costos de construcción, extrapolándose para otros diámetros lo cual se justifica por el coeficiente de correlación de 0.99, como se muestra en la siguiente gráfica.

MATERIALES:

$$\text{Costo} = 140.25 (\text{diámetro}) + 1172.16667* \quad (\$/\text{metro})$$

MANO DE OBRA:

$$\text{Costo} = 74.5 (\text{diámetro}) + 486.91666* \quad (\$/\text{metro})$$

MATERIALES + MANO DE OBRA

$$\text{Costo} = 214.75 (\text{diámetro}) + 1659.08333* \quad (\$/\text{metro})$$

* Indica que el valor se debe afectar por la paridad del dólar.

Las ecuaciones se obtuvieron cuando el dólar costaba:

$$(1985) \quad 215 \text{ M.N.} = 1 \text{ U.S.}$$

$$(1986) \quad 815 \text{ M.N.} = 1 \text{ U.S.}$$

Por lo tanto el factor con que se afecta el costo considerando la paridad del dólar es:

$$K = 815/215 = 3.79$$

TABULACION DE LOS COSTOS

DIAMETRO EN PULGADAS	COSTO UNITARIO TOTAL (\$/metro)
12	16,054.7
14	17,682.5
16	19,310.3
18	20,938.1
20	22,565.9
22	24,193.7
24	25,821.6
26	27,449.4
28	29,077.2
30	30,705.0
32	32,332.8
34	33,960.6
36	35,588.4
38	37,216.2
40	38,843.9
42	40,471.8
44	42,099.6
46	43,727.4
48	45,355.2

3.- Costo de limpieza de la tubería: el área de mantenimiento obtuvo durante 1980 cotizaciones para el servicio de desincrustación, presupuestándose los siguientes costos (para tuberías conductoras de agua separada)

Limpieza mecánica : \$ 764.07/metro

4.- Costo de instalaciones superficiales: estos costos son aproximados proporcionados por la Superintendencia General de exploración (anexo 12).

GRÁFICA COSTO DE CONSTRUCCION vs DIAMETRO

\$/unitario

4,000

3,000

2,000

1,000

$$Y = 214.75X + 1639.08333$$

$$Y = 140.25X + 1172.16667$$

$$Y = 74.5X + 486.916667$$

- 1. MATERIALES (ACCESORIOS Y AISLANTES)
- 2. MANO DE OBRA
- 3. MATERIALES Y MANO DE OBRA

0

6

8

10

12

14

Diámetro (pulg)

ANEXO 10

INVERSION PARA LA CONDUCCION DE AGUA SEPARADA O MEZCLA

ALTERNATIVA A:

Vida económica de la tubería ----- 15 Años
Periodo de mantenimiento ----- 2 Años
Vida económica del sistema ----- 30 Años

Volúmen de la obra:

TRAMO	DIAMETRO (pulgadas)	LONGITUD (metros)
129	16	360
328	16	540
127	16	468
1	22	108

149	12	35
2	26	108
348	16	648
3	30	198
147	16	630
4	34	90
169	16	306
5	38	180
364	16	540
386	16	324
7	24	126
366	16	370
8	28	180
6	40	415
388	16	200
9	48	54
10	48	100

COSTO DE LAS LINEAS DE CONDUCCION DE MEZCLA.

DIAMETRO (pulgadas)	LONGITUD (metros)	COSTO UNITARIO	IMPORTE \$
12	35	16,054.7	562,000
16	4,394	19,310.3	84,850,000
22	108	24,193.7	2,613,000
24	126	25,821.6	3,254,000
26	108	27,449.4	2,965,000
28	180	29,077.2	5,234,000
30	198	30,704.9	6,080,000
34	90	33,960.6	3,056,000
38	180	37,216.2	6,699,000
40	415	38,843.9	16,120,000
48	154	45,355.2	6,985,000
	-----		-----
	5,988		138,418,000

COSTO DE MANTENIMIENTO:

Se asume que el mantenimiento se dará al total de la longitud en el mismo año.

Costo de mantenimiento = \$ 764,07/metro [Anexo 9]

De acuerdo a la paridad del dólar:

Costo de mantenimiento = \$ 2896/metro

Costo total = 2896 (5988) = \$ 17,342,000

FLUJO DE INVERSIONES Y CALCULO DE VALOR PRESENTE:

AÑO	FACTOR DE V.P.	INVERSION \$	V.P. DE LA INVERSION.
0	1	138,418,000	138,418,000
2	0.80	17,342,000	13,873,600
4	0.64	17,342,000	11,098,900
6	0.51	17,342,000	8,844,400
8	0.40	17,342,000	6,936,800
10	0.32	17,342,000	5,549,500
12	0.26	17,342,000	4,508,900
14	0.20	17,342,000	3,468,400
15	0.18	138,428,000	24,916,000
16	0.16	17,342,000	2,774,700
18	0.13	17,342,000	2,254,500
20	0.10	17,342,000	1,734,200
22	0.08	17,342,000	1,387,400
24	0.07	17,342,000	1,213,900
26	0.05	17,342,000	867,100
28	0.04	17,342,000	693,700
30	0.03	17,342,000	520,300

			P= 229,059,300

Cálculo de la serie uniforme:

$$A = \frac{1}{(1+i)^n} P$$

$$A = 0.12414 (229,059,300) = 28,435,422$$

ALTERNATIVA B:

Vida económica de la tubería ----- 15 Años
 Periodo de mantenimiento ----- 2 Años
 Vida económica del sistema ----- 30 Años

Volúmen de la obra:

TRAMO	DIAMETRO (pulgadas)	LONGITUD (metros)
328	16	290
348	16	435
129	16	525
1	22	200
149	14	72
2	28	145
127	16	540
3	32	310
147	18	180
4	36	220
5	36	90
364	16	400
386	16	30
366	16	470
6	22	435
388	18	235
7	28	360
169	18	90
8	34	270
9	36	72

COSTO DE LAS LINEAS DE CONDUCCION DE MEZCLA:

DIAMETRO (Pulgadas)	LONGITUD (metros)	COSTO UNITARIO	IMPORTE \$
14	72	17,682.5	1,273,000
16	2690	19,310.3	51,945,000
18	505	20,938.1	10,574,000
22	635	24,193.7	15,363,000
28	505	29,077.2	14,684,000
32	310	32,332.8	10,023,000
34	270	33,960.6	9,169,000
36	382	35,588.4	13,595,000

	5134		126,626,000

COSTO DE MANTENIMIENTO

Costo total = 5134m (2896 \$/m) = 14,868,000

FLUJO DE INVERSIONES Y CALCULO DE VALOR PRESENTE.

AÑO	FACTOR DE V.P.	INVERSION \$	V.P. DE LA INVERSION
0	1	126,626,000	126,626,000
2	0.80	14,868,000	11,894,400
4	0.64	14,868,000	9,515,500
6	0.51	14,868,000	7,852,700
8	0.40	14,868,000	5,947,200
10	0.32	14,868,000	4,757,800
12	0.26	14,868,000	3,865,700
14	0.20	14,868,000	2,973,600
15	0.18	126,626,000	22,792,700
16	0.16	14,868,000	2,378,900
18	0.13	14,868,000	1,932,900
20	0.10	14,868,000	1,486,800
22	0.08	14,868,000	1,189,500
24	0.07	14,868,000	1,040,800
26	0.05	14,868,000	743,400
28	0.04	14,868,000	594,700
30	0.03	14,868,000	446,000
			205,768,600

SERIE UNIFORME:

$$A = 0.12414 (205,768,600) = 25,544,114$$

ALTERNATIVA C:

Vida económica de la tubería ----- 15 Años
 Periodo de mantenimiento ----- 2 Años
 Vida económica de la obra ----- 30 Años

Volúmen de la obra:

TRAMO	DIAMETRO (pulgadas)	LONGITUD (metros)
149	12	690
328	12	1100
348	12	812
366	10	260
364	12	630
386	10	424
II	18	100
127	12	780
147	10	540
169	10	225
388	10	445
129	12	900
I	16	80

COSTO DE LAS LINEAS DE CONDUCCION:

DIAMETRO (pulgadas)	LONGITUD (metros)	COSTO UNITARIO	IMPORTE \$
10	1,894	14,426.9	27,324,550
12	4,912	16,054.7	78,860,900
16	80	19,310.3	1,544,800
18	100	20,938.1	2,093,800
	-----		-----
	6,986		109,823,900

COSTO DE MANTENIMIENTO:

COSTO = 2,896 (6,986) = \$ 20,231,460

FLUJO DE INVERSIONES Y CALCULO DE VALOR PRESENTE:

AÑO	FACTOR DE V.P.	INVERSION \$	V.P. DE LA INVERSION.
0	1	109,823,900	109,823,900
2	0.80	20,231,460	16,185,200
4	0.64	20,231,460	12,948,100
6	0.51	20,231,460	10,318,000
8	0.40	20,231,460	8,092,600
10	0.32	20,231,460	6,074,100
12	0.26	20,231,460	5,260,200
14	0.20	20,231,460	4,046,300
15	0.18	109,823,900	19,768,300
16	0.16	20,231,460	3,237,000
18	0.13	20,231,460	2,630,100
20	0.10	20,231,460	2,023,100
22	0.08	20,231,460	1,618,500
24	0.07	20,231,460	1,416,200
26	0.05	20,231,460	1,011,600
28	0.04	20,231,460	809,300
30	0.03	20,231,460	606,900

			205,869,400

SERIE UNIFORME:

$$A = 0.12414 (205,869,400) = \$ 25,556,500$$

ANEXO 11

INVERSION PARA LAS LINEAS DE VAPOR

ALTERNATIVA A:

Volúmen de la obra:

TRAMO	DIAMETRO (pulgadas)	LONGITUD (metros)
Alta presión	40	500
Baja presión	26	500

COSTO DE LAS LINEAS:

DIAMETRO (pulgadas)	LONGITUD (metros)	COSTO UNITARIO	IMPORTE \$
40	500	38,843.9	19,422,000
26	500	27,449.4	13,725,000
	----- 1000		----- 33,147,000

COSTO DE MANTENIMIENTO:

El costo de mantenimiento para las líneas de vapor se considera que es la mitad del que se requiere para las líneas que conducen agua separada o mezcla, esto se debe a que el contenido de incrustaciones en las líneas de vapor no es muy alto.

Costo = 2896 \$/metro [anexo 9]

costo = 2896 (1000 m) = 2,896,000

COSTO REAL = \$ 1,448,000

CALCULO DE VALOR PRESENTE:

De igual forma que para las líneas conductoras de agua separada y de mezcla, se calcula el valor presente de la inversión, mostrandose solo los resultados para las líneas de vapor.

$P = \$ 45,000,000$

SERIE UNIFORME:

$A = 0.12414 (45,000,000) = \$ 5,586,000$

ALTERNATIVA B:

Volúmen de la Obra:

TRAMO	DIAMETRO (pulgadas)	LONGITUD (metros)
Alta presión (1-2)	40	560
Baja presión (1'-2')	24	560
Alta presión (2-3)	30	190
Baja presión (2'-3')	18	190
Alta presión (2-4)	28	300
Baja presión (2'-4')	18	300

		2,100

COSTO DE LAS LINEAS:

DIAMETRO (pulgadas)	LONGITUD (metros)	COSTO UNITARIO	IMPORTE \$
18	490	20,938.1	10,260,000
24	560	25,821.6	14,460,000
28	300	29,077.2	8,723,000
30	190	30,704.9	5,843,000
40	560	38,843.9	21,753,000

			61,030,000

COSTO DE MANTENIMIENTO:

$$\text{Costo} = 2,896 (2,100) = \$ 6,081,600$$

$$\text{Costo real} = 3,041,00$$

CALCULO DEL VALOR PRESENTE:

$$P = \$ 83,540,500$$

SERIE UNIFORME:

$$A = 0.12414 (83,540,500) = \$ 10,371,00$$

ALTERNATIVA C:

Volúmen de la obra:

LINEAS DE ALTA PRESION

TRAMO	DIAMETRO (pulgadas)	LONGITUD (metros)
129	16	414
328	16	345
1	22	110
149	14	216
2	26	270
348	16	290
3	30	380
366	12	20
4	32	450
386	14	235
5	32	20
364	14	110
6	38	1300
127	16	360
147	18	270
7	22	380
169	16	145
8	28	435
388	14	165
9	30	650

		6565

LINEAS DE BAJA PRESION.

A	18	460
B	18	185
C	24	520

		1165

COSTO DE LAS LINEAS DE CONDUCCION:

DIAMETRO (pulgadas)	LONGITUD (metros)	COSTO UNITARIO	IMPORTE \$
12	20	16,054.7	321,000
14	726	17,682.5	12,837,500
16	1554	19,310.3	30,008,000
18	915	20,938.1	19,158,500
22	490	24,193.7	11,855,000
24	520	25,821.6	13,427,500
26	270	27,449.4	7,411,000
28	435	29,077.2	12,649,000
30	1030	30,704.9	31,626,000
32	470	32,332.8	15,197,000
38	1300	37,216.2	48,381,000
	----- 7730		----- 202,871,500

COSTO DE MANTENIMIENTO:

Costo = 2,896 (7730) = \$ 22,386,000

Costo real = \$ 11,193,000

CALCULO DE VALOR PRESENTE:

P = \$ 281,177,000

SERIE UNIFORME:

A = 0.12414 (281,177,000) = \$ 34,905,000

ANEXO 12

COSTO DE INSTALACIONES SUPERFICIALES

OBRA MECANICA:

1.- Adquisición e instalación de tuberías (por 6,000 metros).

a) Mano de obra =	256,125.00
b) Materiales =	1,469,039.00
c) Equipo =	129,625.80

	1,854,790.80

2.- Adquisición e instalación de un separador.

a) Mano de obra =	19,364.00
b) Materiales =	3,061,353.00
c) Equipo =	129,626.00
d) Maquinaria =	34,112.00

	3,244,455.00

La capacidad de los separadores instalados a pie de pozo es menor que los necesarios en los colectores, por lo tanto en el análisis de costo para la alternativa C, se considera que el

precio corresponde al 70% del definido anteriormente.

Precio de un separador a pie de pozo = 2,600,000

3.- Instrumentación

a) Mano de obra =	41,546.00
b) Materiales =	85,998.00
c) Equipo =	3,790.00

	104,334.00

4.- Instalación de válvula de esfera.

a) Mano de obra =	51,040.00
b) Materiales =	30,000.00
c) Equipo =	1,527,500.00

	1,608,540.00

OBRA CIVIL:

1.- Construcción de caminos de acceso (1 km).

a) Mano de obra	contratista.
b) Materiales	
c) Equipo =	480,834.00

	480,834.00

2.- Construcción de dos silenciadores Verticales de concreto.

a) Mano de obra =	1,335,477.00
b) Materiales =	1,991,458.00
c) Equipo =	315,654.00

	3,642,590.00

ALTERNATIVA A:

1.- Adquisición e instalación de tuberías	= 1,854,790
2.- Adquisición e instalación de 5 separadores	= 16,222,300
3.- Instrumentación	= 104,334
4.- Instalación de válvula esferica	= 1,068,540
5.- Construcción de caminos de acceso (2 Km)	= 981,668
6.- Construcción de dos silenciadores	= 3,642,540
7.- Material (costo total X 0.2)	

24,414,000

ALTERNATIVA B:

1.- Adquisición e instalación de tuberías	= 2,236,260
2.- Adquisición e instalación de 4 separadores	= 12,977,820
3.- Instrumentación	= 104,334
4.- Instalación de válvula esferica	= 1,608,540
5.- Construcción de caminos de acceso (2.5 Km)	= 1,227,085
6.- Construcción de dos silenciadores	= 3,642,590
7.- Material (costo total X 0.2)	

21,796,630

ALTERNATIVA C:

1.- Adquisición e instalación de tuberías	= 4,549,200
2.- Adquisición e instalación de 11 separadores	= 28,500,000
3.- Instrumentación	= 104,334
4.- Instalación de válvula esferica	= 1,608,540
5.- Construcción de caminos de acceso (5 Km)	= 2,454,200
6.- Construcción de dos silenciadores	= 3,642,590
7.- Material (costo total X 0.2)	

	40,860,000

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Aguirre J.L., Fundamentos de geotermia
Tesis Licenciatura. UNAM. 1983
- 2.- Alvarez S. y Talavera R., Estudio comparativo de los sistemas de conducción de fluido geotérmico en la generación de energía eléctrica.
Tesis Licenciatura. UNAM. 1984
- 3.- Angulo R.C., Diseño de un separador híbrido para agua separada de pozos geotérmicos en Cerro Prieto. 1978
Tesis Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California.
- 4.- Bergles A. y varios., Two-phase flow and heat transfer in the power and process industries. Mc. Graw Hill, U.S.A.
- 5.- Chistopher H. y Armstead H., Geothermal Energy.
London. 1978
- 6.- Crane., Flow of fluids through valves, fitting and pipe.
New York. 1981
- 7.- Di Pippo J., Sourcebook on the production of electricity from Geothermal Energy. U.S. Dept. of Energy. 1980
- 8.- Electroconsult., Estudio de factibilidad de la planta Geotérmica de Cerro Prieto II. Milano Italia. 1979
- 9.- Faires V. Termodinámica. Hispano-Americana. 1970
- 10.- Comisión Federal de Electricidad., Folleto informativo de la Central Geotérmica de Cerro Prieto.

- 11.- Franco R.J., Utilización de energía geotérmica para la creación de espacios de clima controlados en Cerro Prieto Baja California. Tesis Licenciatura. Instituto Tecnológico Regional de Tijuana B.C. 1980
- 12.- Ginoux J.J., Two-phase and heat transfer with application Nuclear Reactor design problems. Washington. 1978
- 13.- Comisión Federal de Electricidad., Generalidades de la Central Geotérmica de Cerro Prieto II.
- 14.- Gutierrez R.R., Estudio de protección y regulación de presión en sistema de vapor para la Planta de Tejamaniles. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Proyecto 40/85/033.
- 15.- Gutierrez R.R., Estudio para determinar las presiones de operación en Cerro Prieto. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Proyecto EI-C-82.
- 16.- Hernández C.M., Modelo matemático del sistema de aceite y gas combustible para una unidad normalizada. Tesis Licenciatura. Instituto Tecnológico de Aguascalientes. 1985
- 17.- Hernández G.J.L., Introducción a la Geotermia. Instituto de Investigaciones Eléctricas. 1985
- 18.- Hiriart L.G., Developments in Geothermal Energy in México economics of wellhead versus central power plants. 1985.
- 19.- I.I.E Estudio de alternativas para la disposición de agua separada del campo Geotérmico de Cerro Prieto II. División de Estudios de Ingeniería. Proyecto 537-EI-C-82. 1980
- 20.- I.I.E Evaluación y control de incrustaciones en Cerro Prieto. Comisión Federal de Electricidad. Proyecto [FE-G1/4]. 1979
- 21.- Instruments Society of America., Principles of automatic process control. U.S.A 1980
- 22.- Ishikawa K., Diágrama de causa y efecto. Diágrama de Ishikawa. Universidad de Tokyo-Japón.
- 23.- Manrique J.A., Termodinámica. Harla. 1976
- 24.- Martínez J.L. y Vinas M.A., Importancia de la sílice en la reinyección de agua geotérmica en los Azufres Michoacán. UNAM.

- 25.- Mercado S. and Guiza. J., Problems of silica scaling at Cerro Prieto Geothermal. Federal Commission of Electricity. México.
- 26.- Ogata K., Ingeniería de control moderno. Madrid. 1979
- 27.- Ohkawara H., Modern power systems. Incorporating energy international. 1986
- 28.- Pita A, y Aguirre O., Curso de análisis y solución creativa de problemas de desarrollo tecnológico. Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- 29.- Sánchez S.F., Estudio de factibilidad del rediseño de líneas de agua separada para la unidad 5. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Reporte 44/3997/I-4/F 1985
- 30.- Sánchez S.F., Estudio bibliográfico de flujo bifásico. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Reporte 250-II-F-42 1981
- 31.- Severns W.H., Energía mediante vapor, aire o gas. Reverté. 1976
- 32.- Smith J.H., Production and utilization of Geothermal steam. Nueva Zelanda. 1985
- 33.- Streeter V.L., Mecánica de los fluidos. Mc. Graw Hill. 1975
- 34.- Tarkin A.J., Ingeniería económica . Mc. Graw Hill. 1979
- 35.- Tobón B.R. y Bello T., Tablas de propiedades Termodinámicas del agua y su vapor. ESIME. 1979
- 36.- United National Proceeding of the second United Nations Symposium on the Development and use of Geothermal Resources. San Francisco. 1975
- 37.- Van Wylen. B.J, Thermodynamics. New York. 1959
- 38.- Wallis G.B., One-dimensional. Two-phase flow. Mc Graw Hill.
- 39.- Weres O. y Tsao L., Kinetics of silica polymerization Universidad de California. 1981