

## I N D I C E

	Página
PREFACIO	X
LISTA DE SIMBOLOS	Y
1.- INTRODUCCION	1
1.1.- Problemas en los pozos geotérmicos	4
1.2.- La aplicación de los tubos de calor como forma de extracción en la energía geotérmica.	6
2.- ZONAS GEOTERMICAS EN MEXICO	10
2.1.- Explotación de las zonas geotérmicas	19
2.2.- Explotación geotérmica en México - (Explotación de la C.F.E.)	27
2.3.- Problemas en los pozos geotérmicos	31
2.4.- Presentación de la gráfica del punto crítico para un yacimiento	38
3.- SUSTANCIAS DE TRABAJO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA	41
4.- DESCRIPCION DE LOS TUBOS DE CALOR	49
4.1.- Características de los tubos de calor	49
4.2.- Historia y teoría de los tubos de calor	54
5.- APLICACION POSIBLE A MANTOS GEOTERMICOS - DEL TUBO DE CALOR	64
6.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y FLUJO DE FLUIDOS EN EL TUBO PROPUESTO	77
7.- REPRESENTACION DEL DIAGRAMA DE FLUJO, - - APLICADO AL TUBO DE CALOR O TERMOSIFON	96
8.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
BIBLIOGRAFIA	



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

HECTOR MANUEL OSUNA BONILLA

A MI MADRE

Ma. de Jesús Bonilla

Que con dedicación, esmero y cariño; se sacrifico - - para mi formación y sigúio creyendo en mi.

A MI PADRE

Bernardo Osuna Sánchez

Por ser el que con humildad y paciencia me apoyo.

A MIS HERMANAS

Guadalupe, Victorina, Socorro y Juventina.

Que con desinterés y esfuerzo me apoyaron en mis estudios y por ser las rectoras de mi formación.

A MIS CUÑADOS

José, Joél, Miguel y Ricardo

Qué de una u otra forma me alentaron a seguir adelante.

A MIS DEMAS FAMILIARES

Que con ilusión opinaban en esta culminación

A MI ESPOSA

Esmeralda Mondragón de Osuna

Que con su apoyo y tolerancia me sirvió de bastión para continuar avanzando; buscando mi perfeccionamiento y progreso.

A MI HIJO

Héctor Jr.

Esperando que lo poco o mucho que encuentre aquí, le sirva de estímulo, y que su futuro sea mejor.

"Nada me detendrá en la vida el seguir adelante es mi obsesión porque el triunfo que estoy buscando lo busco con gran fervor por una causa que es justa y lo digo con razón".

Héctor Osuna

## PREFACIO

La utilización de los recursos geotérmicos con que cuenta el país en un futuro próximo podrán ser comercialmente aprovechados, debido al gran adelanto de México en este campo; se debe procurar que el desarrollo geotérmico del país fructifique en la creación de una tecnología propia que no solo nos permita aprovechar adecuadamente nuestros recursos sino que contribuya a la exportación de bienes y servicios, de gran utilidad dadas las condiciones en que se encuentra actualmente - nuestro país.

Es por ello que se consideró este tema sobre los tubos de calor (termosifón) aplicados a la geotermia, por su amplia gama de utilización, aprovechamiento y economía.

Espero que el tema tratado aquí sea de utilidad y se considere como referencia para las futuras generaciones interesadas en el aprovechamiento de la energía geotérmica, contribuyendo así a ampliar la oferta de energía eléctrica y ahorrando combustibles convencionales debido al incremento que en forma apreciable presenta la electricidad para el futuro.

LISTA DE SIMBOLOS

$\Delta Z$	=	LONGITUD TOTAL DEL TUBO (METROS)
LT	=	LONGITUD DEL TUBO (METROS)
NT	=	NUMERO DE DIVISIONES DEL TUBO (METROS)
D1	=	DIAMETRO INTERNO PARA EL VAPOR (MM)
D2	=	DIAMETRO EXTERNO PARA EL VAPOR (MM)
D3	=	DIAMETRO INTERNO PARA EL LIQUIDO (MM)
D4	=	DIAMETRO EXTERNO PARA EL LIQUIDO (MM)
DHL	=	DIAMETRO HIDRAULICO DEL LIQUIDO (METROS)
DHV	=	DIAMETRO HIDRAULICO DEL VAPOR (METROS)
AL	=	AREA DEL LIQUIDO ( $m^2$ )
AV	=	AREA DEL VAPOR ( $m^2$ )
$\dot{m}_L$	=	CAUDAL DEL LIQUIDO (kg/seg.)
$\dot{m}_V$	=	CAUDAL DEL VAPOR (kg/seg.)
$h_l$	=	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE VALOR POR CONVECCION PARA EL LIQUIDO ( $w/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$h_v$	=	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION PARA EL VAPOR ( $w/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$h_m$	=	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION PARA EL MANTO ( $w/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$k_l$	=	COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TERMICA PARA EL LIQUIDO ( $w/m \cdot ^\circ C$ )
$h_v$	=	COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TERMICA PARA EL VAPOR - ( $w/m \cdot ^\circ C$ )
$k_t$	=	COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TERMICA PARA EL METAL ( $w/m \cdot ^\circ C$ )
$Q_{m-1}$	=	TRANSFERENCIA DE CALOR DEL MANTO AL LIQUIDO (w)
$Q_{u-1}$	=	TRANSFERENCIA DE CALOR DEL VAPOR AL LIQUIDO (w)
$C_{p1}$	=	COEFICIENTE DEL CALOR ESPECIFICO A PRESION CONSTANTE PARA EL LIQUIDO ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
$C_{pv}$	=	COEFICIENTE DEL CALOR ESPECIFICO A PRESION CONSTANTE PARA EL VAPOR ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
g	=	GRAVEDAD ( $m/seg^2$ )
TM	=	TEMPERATURA DEL MANTO ( $^\circ C$ )
TL	=	TEMPERATURA DEL LIQUIDO ( $^\circ C$ )
VL	=	VELOCIDAD DEL LIQUIDO (m/seg.)

PL	=	PRESION DEL LIQUIDO ( $n/m^2$ )
$\rho_l$	=	DENSIDAD DEL LIQUIDO ( $kg/m^3$ )
$\rho_v$	=	DENSIDAD DEL VAPOR ( $kg/m^3$ )
VOLL	=	VOLUMEN ESPECIFICO DEL LIQUIDO ( $m^3/kg.$ )
VOLV	=	VOLUMEN ESPECIFICO DEL VAPOR ( $m^3/kg.$ )
$P_v$	=	PRESION DEL VAPOR ( $N/m^2$ )
VV	=	VELOCIDAD DEL VAPOR (m/seg.)
TV	=	TEMPERATURA DEL VAPOR ( $^{\circ}C$ )
$f_l$	=	COEFICIENTE DE FRICCION PARA EL LIQUIDO
$f_v$	=	COEFICIENTE DE FRICCION PARA EL VAPOR
$RQ_{m-1}$	=	RESISTENCIA TERMICA PARA EL FLUJO DE CALOR DEL MANTO AL LIQUIDO ( $m^2\ ^{\circ}C/w$ )
$RQ_{v-1}$	=	RESISTENCIA TERMICA PARA EL FLUJO DE CALOR DEL VAPOR AL LIQUIDO ( $m^2\ ^{\circ}C/w$ )

## RECONOCIMIENTO

El presente trabajo de tesis inicial mente fué, supervisado por el M en I - - Diego Alfonso Sámano Tirado y el Ing. -- Carlos Flores Ruiz. La versión final de la tesis fué revisada por el Dr. José - Luis Fernández Zayas.

Quiero dar las más cumplidas gracias a todos aquellos que me brindaron su ayu da generosa, para la formación de este - trabajo.

## 1.- INTRODUCCION

En las primeras etapas de la vida de nuestro planeta, este se encontraba cubierto de espesa vegetación y agua en abundancia con lo que se propició la vida animal; al transcurso del tiempo, notables cambios se sucedieron acompañados de fuertes movimientos telúricos que dieron nacimiento a las cadenas montañosas y fueron configurando los actuales continentes, ocasionando que parte de la vida animal y vegetal quedara atrapada entre grandes masas de roca y tierra, que al paso de millones de años y mediante un lento proceso bioquímico se convirtieron en los combustibles fósiles que hoy en día conocemos, los cuales por mucho tiempo (desde que el hombre aprendió a utilizarlos) fueron considerados como inagotables. En la actualidad, sin embargo, se presenta un gran déficit de dichos combustibles fósiles.

Los combustibles fósiles han sido la base de la producción de energía eléctrica de la cual la humanidad depende en gran escala y esto provoca que la demanda de electricidad se incremente en forma alarmante, ocasionando serios y graves problemas en la reserva de energéticos fósiles en el mundo.

Es así que los esfuerzos de la ciencia se han encaminado a la búsqueda de nuevas fuentes de energía como son: el aprovechamiento de la energía contenida en el átomo, en las mareas, en los vientos, en la radiación solar y otras más, en

entre las que se encuentra la energía geotérmica que ha contribuido en forma inmediata para satisfacer de alguna manera - - cierto déficit existente de energía. Actualmente el potencial geotérmico que se está aprovechando en nuestro país, así como a nivel mundial, es prácticamente insignificante, aunque la evidencia demuestra que su desarrollo puede llegar a un grado tal que puede competir con otras fuentes de energía.

Por esta razón se están realizando diversos estudios para la búsqueda de reservorios geotérmicos que permitan explotar multitud de campos geotérmicos que seguramente existen en nuestro país, pues se ha encontrado una estrecha relación entre el volcanismo de una área y la existencia de campos geotérmicos, ya que nuestro país tiene características eminentemente volcánicas. Es factible encontrar innumerables zonas geotérmicas en las que se pueden instalar plantas geotermoeléctricas; uno de los beneficios del aprovechamiento integral de la energía geotérmica es la utilización de los sobrantes del fluido geotérmico, entre los que se encuentran en primer lugar el agua que puede obtenerse en cantidades muy importantes asociada con una serie de sustancias químicas que se encuentran disueltas en el fluido geotérmico y cuya industrialización es económicamente factible.

La geotermia constituye un área de interés a largo plazo, pues por una parte representa una oportunidad de diversificación de fuentes de energía congruente con las realida-

des energéticas mundiales y por la cual México se encuentra en una posición muy ventajosa, por sus características tectónicas, y por otra, que aunque los avances y los resultados logrados hasta ahora son muy significativos, el aprovechamiento de los recursos geotérmicos ofrece muchas oportunidades de investigación, desarrollo; tecnología y de expansión en las fronteras del conocimiento.

El estudio de reservorios geotérmicos busca resolver no solo los problemas tecnológicos de las modalidades actuales de la explotación para los recursos geotérmicos, sino también prever y desarrollar la siguiente generación de la tecnología para aprovechar esta fuente de energía, ya que la crisis energética (principalmente del petróleo) ha colocado a la humanidad en una difícil situación donde las sociedades del mundo esperan que sus científicos encuentren o transformen nuevas formas de energía. La productividad de energía eléctrica en nuestro país se está logrando mediante una alta proporción de consumo de hidrocarburos, aunque la utilización de estos combustibles para la generación de electricidad, constituye un alto costo y un atentado contra nuestra balanza de pagos; por eso se cree conveniente buscar nuevas fuentes de energía.

México cuenta con enormes recursos de energía geotérmica, por lo cual se encuentra entre los países de más brillante porvenir en esa rama, ya que se conocen hasta la fecha

más de 10 zonas geotérmicas en las cuales se puede obtener va por generado bajo las superficies; tales recursos naturales - de tan importante valor no han sido del todo desaprovechados en nuestro país, pues una de las zonas geotérmicas más importantes en la actualidad es la de Cerro Prieto, B.C.N; ya que ahí se encuentra localizada la zona geotérmica más importante de nuestro país, en donde se trabaja aceleradamente para incrementar la producción de la planta geotermoeléctrica construida en ese sitio.

#### 1.1. Problemas en los Campos Geotérmicos.

En la explotación de campos geotérmicos es convenien te nombrar a los principales yacimientos, para el aprovechamiento de la extracción de la energía geotérmica del subsuelo; esos campos son los de líquido dominante (agua caliente) y de vapor dominante (vapor seco) que son los más comunes en nuestro país, y en la actualidad se está explotando el de líquido dominante (agua caliente).

En los yacimientos de líquido dominante (agua calien te) se extrae una gran cantidad de agua; el fluido separado - de esa zona tiene una considerable cantidad de energía interna y energía de flujo que se puede convertir en trabajo dispo nible en la flecha de una turbina y finalmente en energía eléc trica.

En estos yacimientos se presentan problemas en el sistema de explotación porque se tiene un elevado contenido de cloruros, o sea que se producen grandes cantidades de salmuera (sales) y debido a eso se forman corrosiones en las tuberías de revestimiento y de producción y en los álabes de las turbinas; además, se tienen mayores depositaciones de minerales por las salmueras explotadas en éstos.

Los reservorios de vapor dominante (vapor seco) actualmente se encuentran en estudio, por esa razón no se han podido explotar porque falta recabar más información sobre ellos.

De estos yacimientos se sabe que su existencia es circunstancial por su formación con el fluido en el fondo de la corteza terrestre, ya que ciertos factores favorecen la formación y la separación de vapor a grandes profundidades, requiriéndose necesariamente la existencia de agua, porque no alcanzaron la superficie y quedaron atrapados a una relativa baja profundidad, de entre 5 - 10 km; aproximadamente; sin embargo con los estudios que se le han estado realizando se ha concluido que pueden ser explotados porque se tendrá un mejor aprovechamiento de la energía geotérmica extraída, pues en estos reservorios no se tendrán los problemas de corrosión en las tuberías ocasionados por las salmueras o desechos de sales existentes en el sistema de explotación y además no habrá contaminación ambiental como se tiene en los yacimientos de líquido

dominante (agua caliente).

1.2.-La aplicación de los tubos de calor como forma de extracción de energía geotérmica.

Aunque en México actualmente se están descubriendo importantes yacimientos petroleros y dado que un gran porcentaje de la generación de energía eléctrica descansa en los energéticos del tipo de los hidrocarburos, conviene la utilización de fuentes de energía no convencionales como la geotermia, ya que los hidrocarburos algún día se terminarán y por tal motivo es indispensable acelerar y aprovechar el uso de este tipo de energía.

Con los estudios y análisis que se han realizado en campos geotérmicos, se ha llegado a comprobar que pueden ser aprovechados en su máxima eficiencia; además, que tanto su equipo como sus instalaciones no son muy costosas en comparación con los de los hidrocarburos. Por eso se están implantando nuevas tecnologías y métodos que sean rápidos y eficaces para establecer criterios de aplicación general en busca de un mayor aprovechamiento de la energía geotérmica; una de esas técnicas o métodos para aprovechar dicha energía puede ser el tubo de calor, que es un dispositivo recientemente descubierto y desarrollado que se emplea para transportar eficientemen

te la energía térmica; es cerrado, generalmente es cilíndrico y contiene una sustancia de trabajo que transportará energía térmica de una parte llamada evaporador a otra llamada condensador por medio de un proceso de vaporización. Hasta la fecha se están realizando innovaciones de dicho tubo de calor para aprovechar mucho mejor la transformación de la energía térmica. Ver fig (1.1 y 1.1a)

El flujo de vapor dentro de la región del tubo de calor se aprovecha de la siguiente forma: el vapor pasa al condensador y después de que se inunda en forma parcial, el líquido retorna al evaporador por acción capilar, en donde se debe aprovechar toda la transferencia de energía térmica existente en el medio; se presentarán variaciones con respecto a la presión y temperatura en la región del vapor dentro del tubo de calor, correspondientes a la temperatura de vapor saturado y la de presión de vapor saturado; además, de acuerdo a sus características estara muy cercano al comportamiento de un proceso isotérmico ( $T = \text{cte.}$ ).

El tubo de calor puede tener diversas formas y se puede utilizar en varios tamaños, considerando también dentro de su selección la temperatura, el tipo de sustancia de trabajo y el material que se desee usar para su diseño. Cuando se describan características propias del tubo de calor como: - - transferencia de calor, conductividad térmica, masa del sistema, capacidad volumétrica del vapor, etc, se podrá decir que

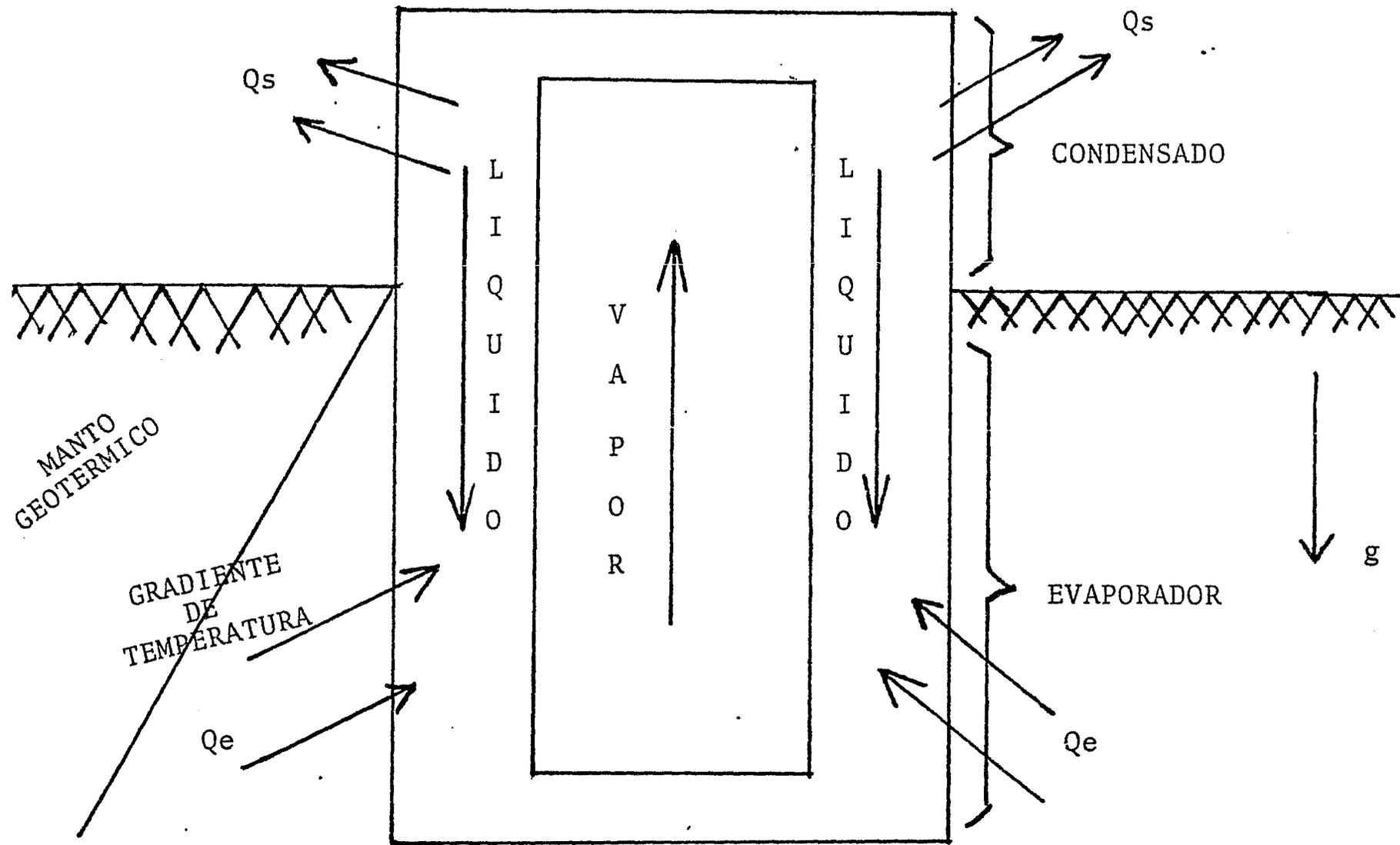


Fig (1.1) TUBO DE CALOR CON ESTRUCTURA CAPILAR POROSA

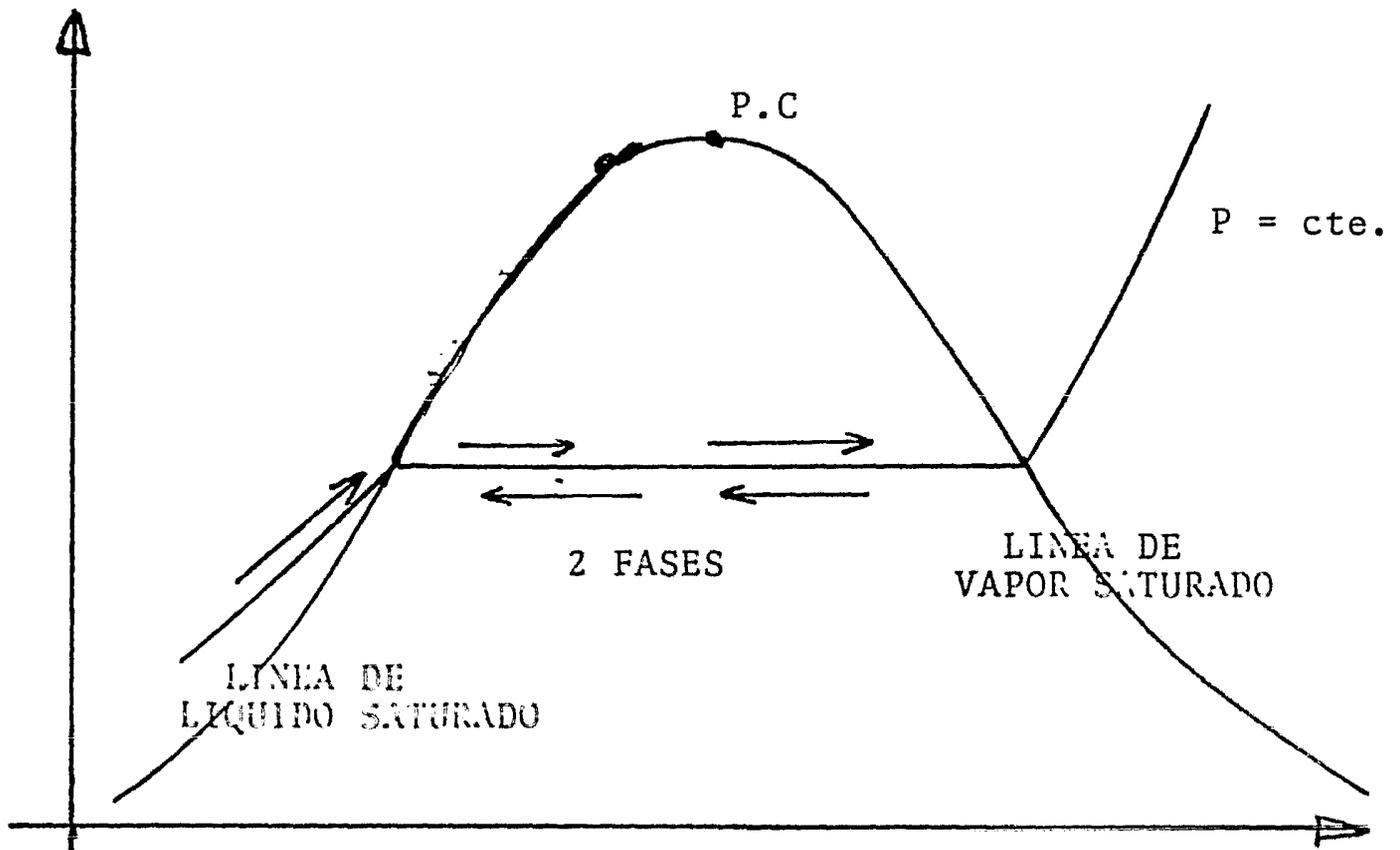


Fig (1.1a) DIAGRAMA (T-S) PARA EL TUBO DE CALOR

estas serán individuales, pero no independientes. Esto quiere decir que el dispositivo no dependerá únicamente de las características propias, sino que también se tiene que considerar - su forma, tamaño, tipo de sustancia y el material de construcción para su diseño.

La sustancia de trabajo que se utilice en el tubo de calor, deberá ser una sustancia pura, simple compresible, homogénea e invariable, la cual puede seleccionarse de acuerdo a las propiedades termodinámicas de las sustancias para que cumpla con las necesidades del tubo de calor, con el fin de que se tenga un mayor aprovechamiento en la transferencia de calor y una mejor eficiencia dentro del tubo de calor.

En la figura siguiente se ilustra esquemáticamente el flujo de calor en un tubo de calor aplicado a la geotermia, así como un diagrama T-S representando los cambios termodinámicos de la sustancia de trabajo.

En este trabajo de tesis profesional se propone la utilización de un tubo de calor particular, similar al tubo de calor convencional, pero donde se omite la sección adiabática. Este tubo de calor permitirá extraer energía en toda su longitud. Además, no requerirá del medio capilar por lo que su eficiencia será máxima. Aplicado a la geotermia, permitirá la extracción del calor subterráneo sin extraer el agua del yacimiento, permitiendo eliminar de esta forma la corrosión debida a los sólidos en suspensión y en dilución. Se elimina asimismo el daño al yacimiento, y al pozo mismo, al eliminar la extracción de agua.

## 2.- ZONAS GEOTERMICAS EN MEXICO:

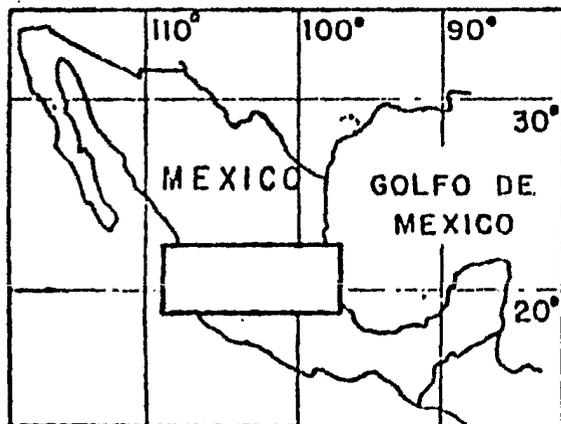
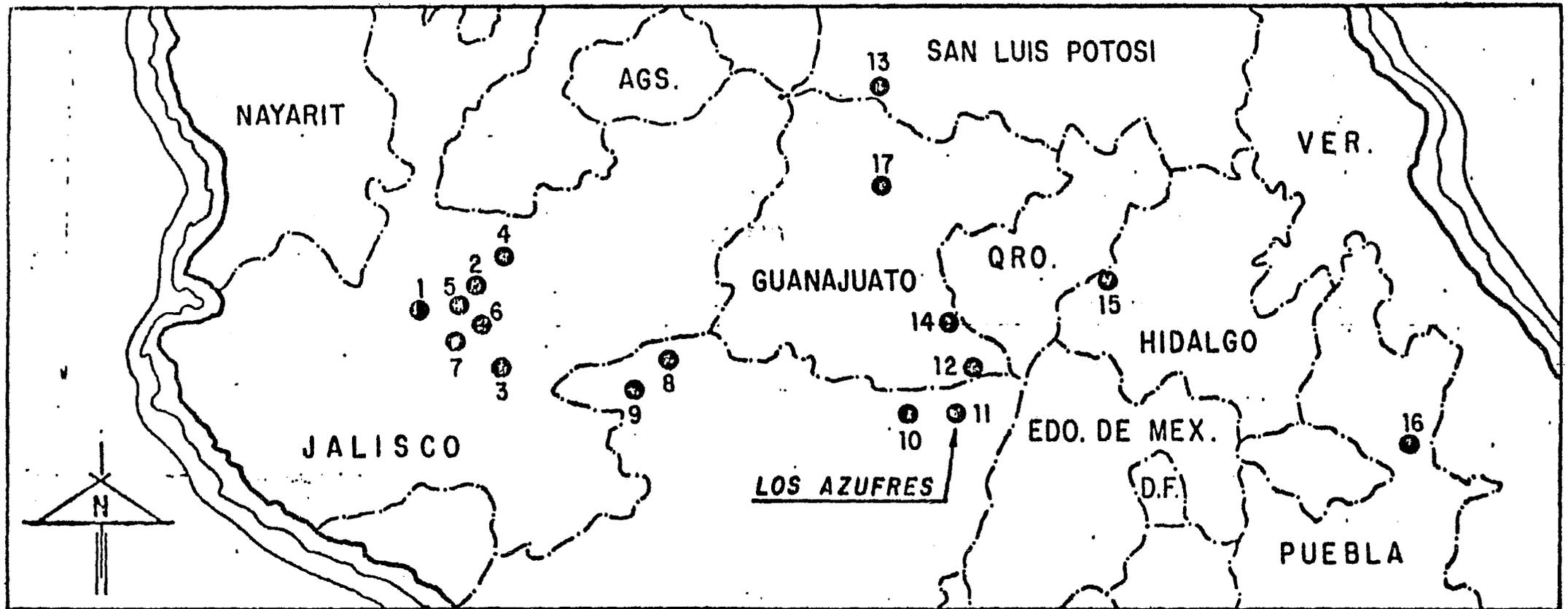
La mayor cantidad de manifestaciones termales en nuestro país se encuentran localizadas en el eje neovolcánico. Las características de esta zona son de formaciones volcánicas; esta zona está comprendida entre los paralelos 19° y 23° de latitud norte, ver figs 2.1, 2.2 y 2.3, sin olvidar también la zona termal más importante en la actualidad que está localizada a 30 kms, al S.E. de la ciudad de Mexicali, B.C.N; la característica de esta zona es de medio sedimentario.

Las zonas geotérmicas que se encuentran localizadas en México son las siguientes:

1. En el estado de B.C.N. (zona de medio sedimentario):

a).- Cerro Prieto: esta zona es conocida como la perla negra de la geotermia, donde se trabaja aceleradamente para incrementar la producción de la planta geotermoeléctrica ya construida y que tiene actualmente 180 MW de capacidad instalada.

Esta zona geotérmica es de un medio sedimentario (aquí se encuentra la falla de la corteza terrestre desde el golfo de California hasta la ciudad de San Francisco, Cal.) en la cual los primeros trabajos de exploración se realizaron en 1959, habiéndose recopilado una gran cantidad de información por ingenieros y científicos mexicanos, incluyendo in---



- |                                |                                     |                          |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| 1.- Hervores. de la Vega, Jal. | 7.- Villa Corona, Jal.              | 13.- El Gogorron, S.L.P. |
| 2.- La Primavera, Jal.         | 8.- Los Negritos, Mich.             | 14.- San Bartolome, Gto. |
| 3.- San Marcos, Jal.           | 9.- Ixtlan de los Hervores, Mich.   | 15.- Pathe, Hgo.         |
| 4.- La Soledad, Jal.           | 10.- Lago de Cultzeo y Araro, Mich. | 16.- Los Humeros, Pue.   |
| 5.- Agua Caliente, Jal.        | 11.- Los Azufres, Mich.             | 17.- Comanjilla, Gto.    |
| 6.- San Isidro Mazatepec, Jal. | 12.- Puruagüita, Gto.               |                          |

LOCALIZACION DE LOS CAMPOS GEOTERMICOS MAS IMPORTANTES DEL EJE NEOVOLCANICO.

Fig 2.1

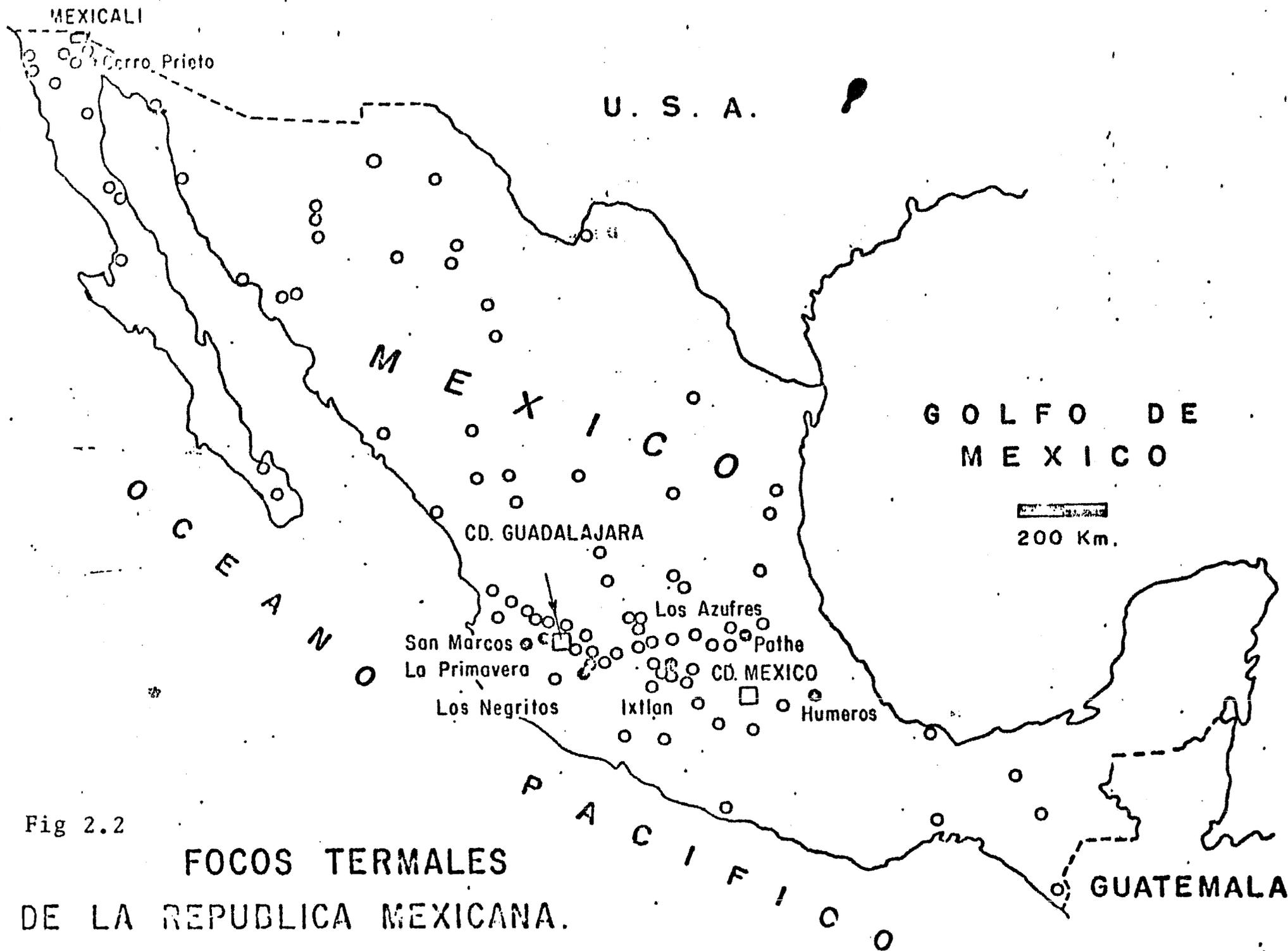
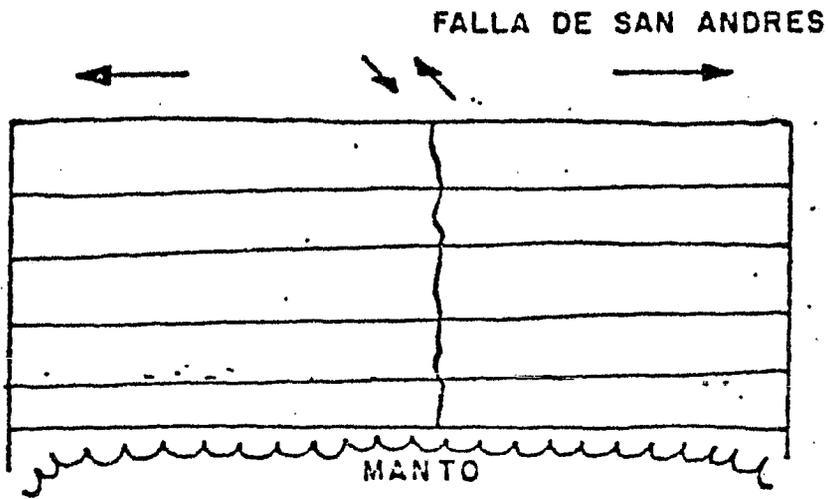
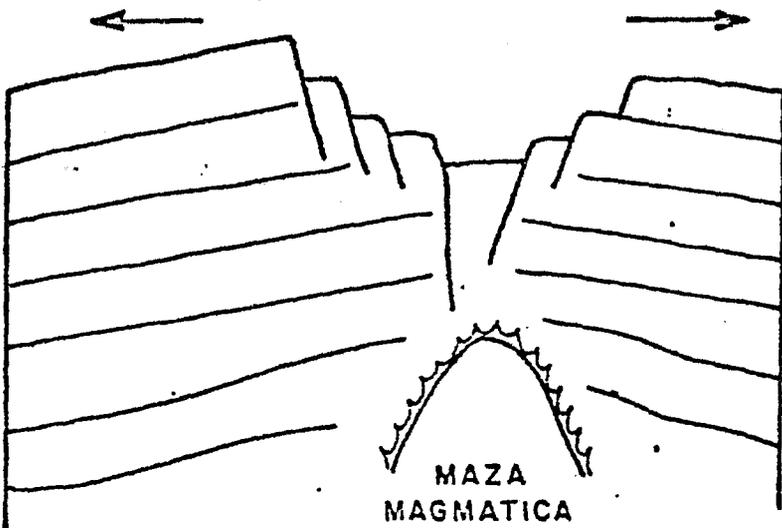


Fig 2.2

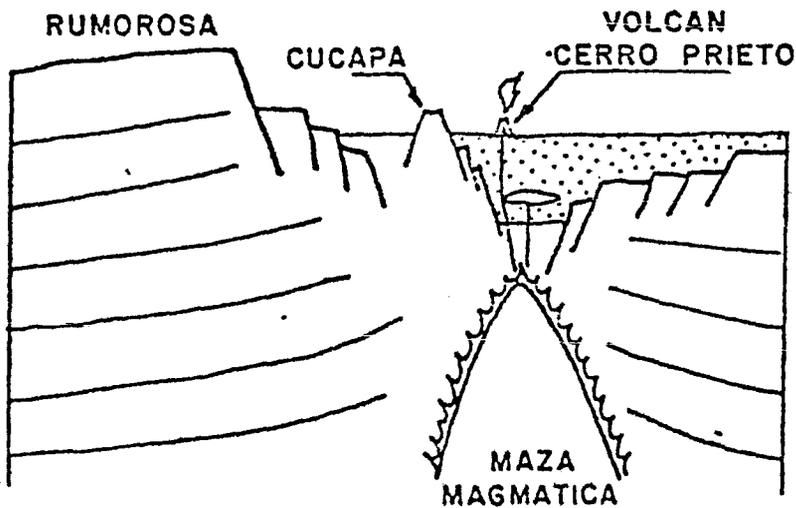
**FOCOS TERMALES  
DE LA REPUBLICA MEXICANA.**



CORTE DE LA CORTEZA TERRESTRE EN EL AREA DE MEXICALI.



LA MISMA AREA DESPUES DE MILLONES DE AÑOS AL CORRERSE Y SEPARARSE LAS PLACAS TECTONICAS.



FORMACION DEL VALLE DE MEXICALI CON SEDIMENTOS DEL RIO COLORADO Y MIGRACION DE FLUJOS MAGMATICOS QUE DIERON ORIGEN AL CAMPO DE CERRO PRIETO.

ESQUEMAS CUALITATIVOS DE LA FORMACION DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO.

Fig 2.3

formación geológica, geofísica y geoquímica principalmente.

El funcionamiento real para la generación de energía eléctrica comercial se inició a partir de 1973; además, se dispone para la casi totalidad de los pozos existentes de estudios de registros geofísicos y litológicos, datos de producción, de temperatura, así como de presiones en la cabeza y en el fondo de los pozos.

La zona geotérmica de Cerro Prieto se caracteriza por tener elevadas concentraciones de cloruros en los manantiales, con descarga regular de agua caliente; en este tipo de zona se tiene contenido de cloruros que van de 8,000 - 9,000 ppm, y en los pozos bajo explotación se tiene un contenido de cloruros que van de 10,000 - 20,000 ppm.

2.- En el estado de Michoacán (zona de medio volcánico):

A).- Los Azufres: en esta zona se están llevando a cabo una serie de estudios previos de tipo geológico regional y de detalle, así como de la resistividad y geoquímica para detectar la amplitud de la zona geotérmica; en la actualidad se tiene localizada una zona en la cual se han perforado 34 pozos profundos, obteniéndose resultados excelentes en varios sitios; inclusive se tienen pozos de vapor seco. A finales de 1982, se pusieron en operación 5 unidades a boca de pozo de 5 MW cada una y se tiene programado instalar 2 plantas de 55 MW, antes de 1990. El potencial del campo se estima que -

será de 300 MW.

Las explotaciones previas han demostrado que la zona de interés geotérmico tiene una superficie de 17 KM<sup>2</sup>, en la cual se pueden alojar un buen número de pozos geotérmicos con probabilidades de encontrar temperaturas atractivas; en esta zona se tiene un contenido medio de salinidad y de cloruros, indudablemente que los factores principales que intervienen son la temperatura y el tipo de roca en contacto con el agua.

B).- Ixtlán de los Hervores y los Negritos: - - estas zonas cubren una área de aproximadamente 550 KM<sup>2</sup>, y se le están haciendo estudios de vulcanismo, geoquímica, geofísica y geología; además, se están concluyendo los informes en los que se incluye la localización de 2 exploraciones profundas que servirán para cuantificar el potencial geotérmico existente en ese lugar. El área de Ixtlán tiene la característica de que en una exploración realizada hace más de 20 años, se perforaron 2 pozos, uno de los cuales fluye desde esa época pero que todavía no ha sido explotado en forma normal.

C).- Lago de Cuitzeo: esta zona abarca una área aproximadamente de 5,000 KM<sup>2</sup>, e inclusive diversas zonas geotérmicas localizadas en la periferia del lago de Cuitzeo; los sitios termales más importantes de esa zona son los siguientes: San Sebastián, Las Arenas, Huandacaroo, Nispo, San Agustín del Maíz, San Juan Tararameo, La Mina, Queréndaro, Huingo

y el Hararo; de todas estas zonas a la que se le está dando mayor importancia es la de el Araro, se le están haciendo estudios geofísicos, geológicos y geoquímicos. En fechas próximas se tendrá la localización de 2 pozos que servirán para hacer una exploración y determinar qué características tiene -- cada uno de ellos.

3.- En el estado de Jalisco (zona de medio volcánico):

A).- La Primavera: en esta zona se están realizando estudios de vulcanismo, geofísica y geoquímica en una área de 7,000 KM<sup>2</sup> aproximadamente, que servirán para determinar las características del yacimiento geotérmico existente en esa zona. Estos estudios hasta la fecha han arrojado resultados muy optimistas y además han servido para ubicar una serie de pozos profundos que aportarán información concreta en cuanto al potencial de la zona geotérmica.

En esta zona se encuentran depósitos calcáreos que de acuerdo a los estudios efectuados, indican que se tienen temperaturas bajas en la profundidad, esto quiere decir que las aguas profundas se mezclan con aguas superficiales; sin embargo, también se han detectado escapes de agua con cloruros provenientes de acuíferos profundos, aproximadamente a una altitud de 2,000 metros sobre el nivel del mar; dichos escapes de vapor tienen una gran intensidad que sugieren las existencias de un yacimiento con predominio de vapor dominante;

empero, a los alrededores y a menos altitud se tienen manantiales de gran flujo de aguas cloruradas lo cual indica necesariamente la existencia de un reservorio con predominio de líquido dominante; además, se tiene la existencia de otros elementos tales como boro, bromo, y litio en manantiales de aguas frías que pueden ser indicativos de reservorios de líquido dominante en la profundidad.

4.- En el estado de Puebla (zona de medio volcánico):

A).- Los Humeros: esta zona se encuentra localizada en las cercanías de Perote, Ver; en esta zona se perforaron 3 pozos profundos, obteniéndose excelentes resultados - pero no están en explotación; actualmente se continúan realizando perforaciones de exploración, el área de estudio es del orden de 5,000 KM<sup>2</sup>, y resulta promisoría, ya que la cubierta es de rocas ígneas ácidas recientes; además, descansa sobre una estructura de rocas sedimentarias que favorece ampliamente el suministro geohidrológico a esta zona geotérmica; asimismo, se están efectuando estudios de geología, geofísica y geoquímica que permitan estimar la factibilidad de explotación mediante perforaciones.

5.- En el estado de Chiapas:

Al sur del eje neovolcánico (es zona de medio volcánico) se conocen actualmente 2 sitios de interés que son:

A).- Tolinán en las cercanías de Tapachula.

B).- El volcán de la Unión en las cercanías de Pichucalco.

En la actualidad no se tiene bien definidas las características de esa zona geotérmica; únicamente se le están efectuando estudios que comprenden geología regional, geología de detalle, geoquímica y geofísica mediante resistividad.

Paralelamente se están efectuando inventarios de focos termales en el país por lo cual se dispone de una brigada con la que se efectúa un muestreo geotérmico preliminar, registrándose el sitio mediante coordenadas y haciéndose una descripción general. También recientemente se ha iniciado el uso de los materiales fotográficos del satélite Skylab utilizándo se la información digital obtenida por dicho satélite y se ha iniciado la obtención de planos termales que permiten de un modo relativamente rápido y económico encontrar las anomalías termales más importantes del país.

Dentro del terreno de intercambio técnico el área de la geotermia mantiene relaciones continuas con los diversos organismos dedicados a la investigación; también se mantiene en contacto con los diversos organismos geotérmicos de otros países. En otras palabras se puede decir que ésta es la actividad principal de investigadores geotérmicos, que desarro-llan la Comisión Federal de Electricidad y el Instituto de Investigaciones Eléctricas, y se espera encontrar nuevas técnicas y métodos más económicos que permitan hacer realidad mu-

chas plantas geotermoeléctricas como la de Cerro Prieto en Mexicali, B.C.N.

### 2.1.-Explotación de las zonas geotérmicas:

En teoría la ingeniería de yacimientos se inició -- con la perforación del primer pozo petrolero en 1859; pero en la década de 1930, la ingeniería de yacimientos empezó a realizar las primeras mediciones de los volúmenes de fluidos y -- las primeras estimaciones de las propiedades del fluido y de la roca del yacimiento por medio de mediciones efectuadas en laboratorios y de registros eléctricos. Este acelerado avance en la medición de las propiedades de los fluidos y de las rocas fue el resultado del rápido desarrollo de la tecnología para los yacimientos. Pero en la práctica la perforación de yacimientos aconteció en la década de 1940, que fue cuando se publicaron los primeros estudios relacionados sobre el flujo de fluidos en medios porosos.

Las investigaciones realizadas en los yacimientos -- geotérmicos incluyen actividades que se inician con la localización de pozos a partir de los estudios ejecutados por la -- geología, geofísica y geoquímica; así como también mediciones efectuadas durante la perforación que dan como resultado el -- cálculo del potencial del campo y la predicción de su comportamiento.

El éxito que se tenga en la explotación de un campo geotérmico radica principalmente en la adecuada selección del mismo, es decir, que efectivamente se esté explotando una zona potencialmente productiva; la decisión de hacer las perforaciones de uno o varios pozos en una determinada zona geotérmica, deberá estar perfectamente fundamentada, para lo cuál habrá que recurrir a todos los medios posibles que conduzcan a la obtención de la información más completa, tanto de las condiciones geológicas, como geohidrológicas del posible campo geotérmico.

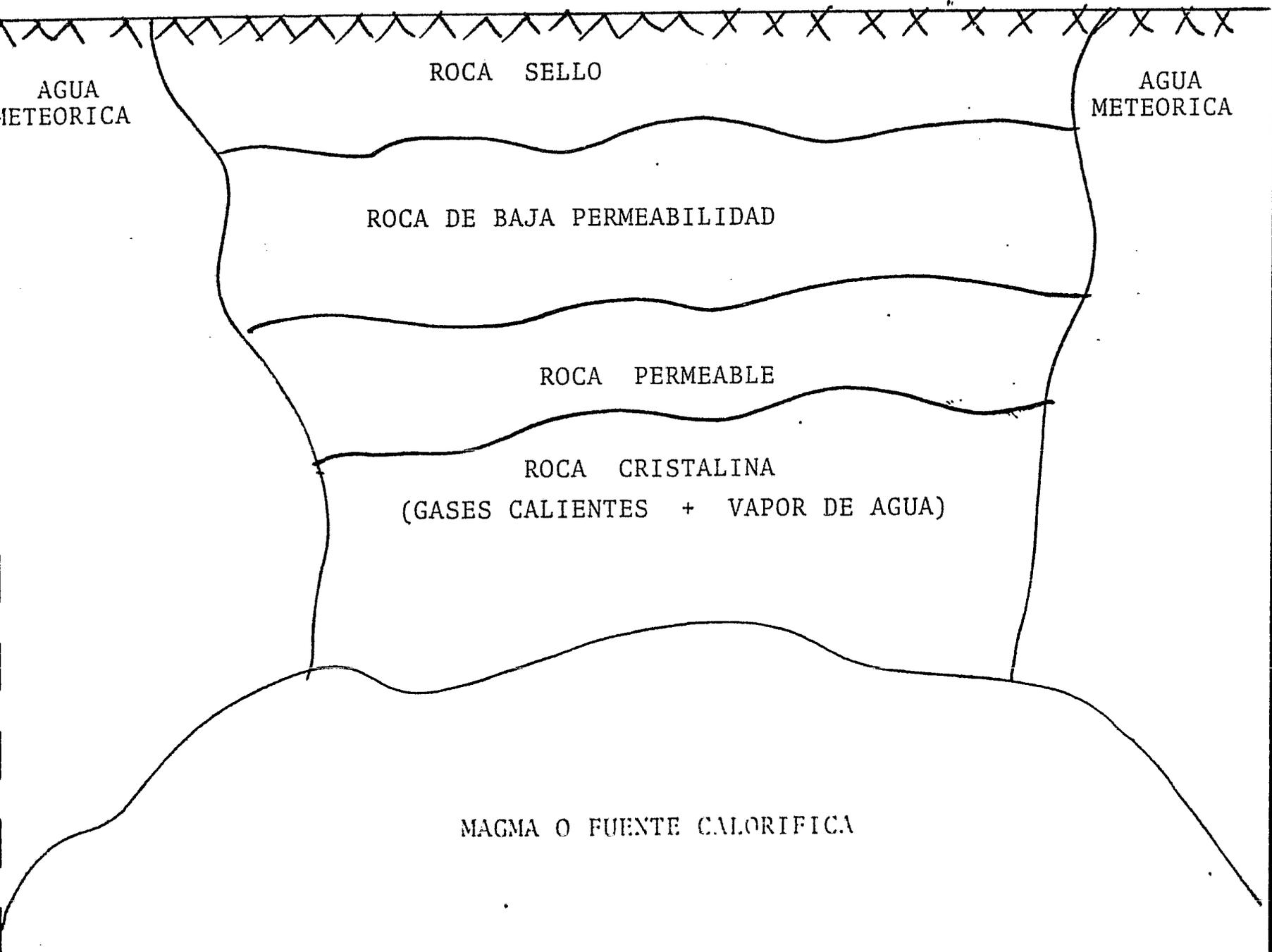
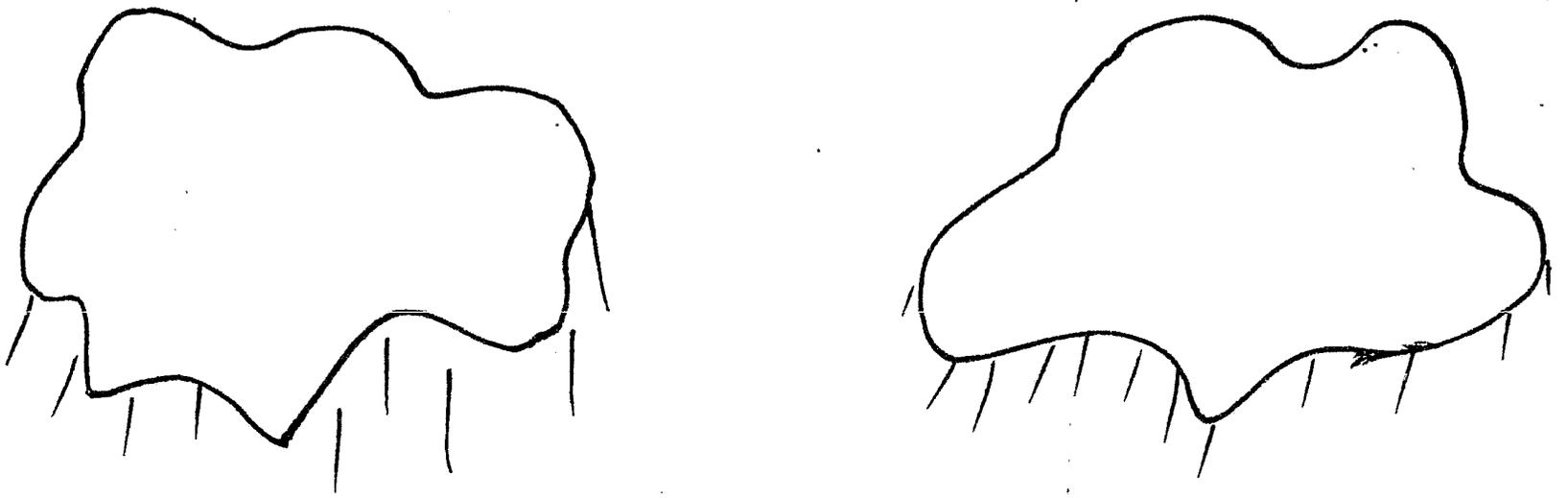
Existen lugares donde el calor natural de nuestro planeta, que normalmente está a grandes profundidades, es transferido a unos pocos metros de la superficie del suelo; cuando este fenómeno coincide con acuíferos, el calor es transferido al agua y el resultado es lo que ahora conocemos como energía geotérmica. Es por eso que se dirá que para la formación de un reservorio geotérmico típico se requiere que; se presenten migraciones horizontal y vertical que es provocada a través de fracturamientos, atrapamiento de masa de magma o fuente de calor que se pone en contacto con acuíferos someros o filtraciones de agua meteórica la cual, al liberar calor y gases durante su proceso de cristalización y enfriamiento incrementa grandemente la temperatura de acuíferos profundos; esta se puede encontrar de 5 - 10 Kms, aproximadamente de profundidad, profundidad del cuerpo poroso permeable permanente

que no exceda de 2 - 3 kms, tamaño del yacimiento que no sea menor de 2- 3 km<sup>3</sup>, que la roca sello sea lo suficientemente impermeable y que no se presenten pérdidas del fluido y de calor para que no existan problemas insolubles en la producción de fluidos. Ver fig 2.4

Estos yacimientos geotérmicos se encuentran en varias formas en la naturaleza y se pueden definir principalmente como; yacimientos de líquido dominante (agua caliente), yacimientos de vapor dominante (vapor seco), sistemas geopresurizados, y las formaciones compuestas por roca seca muy caliente. Aunque cada una de estas formas es potencialmente explotable, los yacimientos de vapor dominante (vapor seco) y de líquido dominante (agua caliente) son los que ofrecen las mejores características para la generación de electricidad.

Aunque en la actualidad se están explotando reservorios de líquido dominante (agua caliente) que se encuentra uno de ellos en Cerro Prieto, B.C.N; ver fig 2.2, que es el más importante en la actualidad, se están haciendo estudios para poder explotar los yacimientos de vapor dominante (vapor seco); porque sus características son las mejores y que además tiene la ventaja de ser más eficientes y útil por el simple hecho de eliminar los desechos salinos o la salmuera que existe en los yacimientos de líquido dominante (agua caliente).

Considerando de antemano lo anterior es indispensable buscar métodos o técnicas básicas que se empleen para la



2.11 FORMACION DE UN YACIMIENTO GEOTERMICO

explotación de los yacimientos geotérmicos, que servirán para determinar las propiedades de las rocas, sedimentos, características del fluido; además, serán decisivas para el conocimiento y determinación de cómo distinguir un campo geotérmico, así como para entender el fenómeno geológico del mismo.

Estas técnicas o métodos son los siguientes:

- 1.- Comportamiento de los yacimientos geotérmicos
- 2.- Evaluación sistemática de las propiedades termodinámicas por medio de electrolitos aplicados a los yacimientos geotérmicos
- 3.- Medición precisa de la velocidad de ondas sísmicas en los yacimientos geotérmicos con fallas geológicas
- 4.- Geoquímica hidrotérmica
- 5.- Análisis de pruebas de presión en pozos geotérmicos.

1. Comportamiento de los yacimientos geotérmicos: con esta técnica se desarrollan códigos para simular la dinámica del flujo de calor y la migración de los fluidos; -- además, se estudian muestras de núcleos extraídos de pozos perforados para determinar el comportamiento de las rocas a altas temperaturas y presiones, así como la alteración que se tenga al estar en contacto con fluidos geotérmicos saturados.

2. Evaluación sistemática de las propiedades termodinámicas por medio de electrolitos aplicados a los yacimientos geotérmicos: esta técnica se utiliza para interpretar

el comportamiento de los fluidos geotérmicos en la profundidad, así como para determinar las medidas de la solubilidad hidrotérmica de diversos compuestos químicos que se encuentran en la profundidad; dichas medidas serán una guía para el conocimiento de transferencia de masa y cambios químicos que se presenten en el campo geotérmico.

3. Medición precisa de la velocidad de ondas sísmicas en los yacimientos geotérmicos con fallas geológicas: esta técnica se utiliza para determinar la acumulación de esfuerzos en la corteza terrestre, también para delimitar las zonas de alteración hidrotérmicas y para detectar cámaras magnéticas que puedan tener influencia en la existencia de un yacimiento geotérmico; además, sirve para determinar las proporciones químicas de fluidos descargados por manantiales termales o pozos perforados que son ampliamente usados como geotermómetros para obtener datos muy confiables de las temperaturas que existan en el subsuelo.

4. Geoquímica Hidrotérmica: esta técnica es una de las más útiles y económicas comparadas con las otras, ya que se emplea en la exploración de los campos geotérmicos, y permite realizar estudios e investigaciones de manantiales fríos o calientes, fumarolas y vaporeras. Con el estudio se puede conocer la concentración y composición de los fluidos del reservorio, sus temperaturas, el tipo de sistema (vapor dominante o líquido dominante), el tipo de rocas en contacto

con los fluidos, el origen de los fluidos, la dirección del flujo en el área, la posible formación de depósitos, la probable fuente de calor, las zonas de elevada permeabilidad y también indica la existencia de campos geotérmicos sin que haya actividad superficial (donde la actividad superficial o alteración hidrotérmica es una guía para conocer ciertos parámetros geoquímicos o sea que indicará la naturaleza y el grado de mineralización de los manantiales que existen en cada una de las zonas geotérmicas).

5. Análisis de pruebas de presión en pozos geotérmicos: esta técnica se utiliza para determinar en forma indirecta una o más propiedades del yacimiento; los datos de presión necesarios para el análisis de presión se obtienen con el registro de la presión del pozo contra el tiempo, al hacer variar el gasto del pozo.

Además sirve para determinar la caracterización correcta de un yacimiento geotérmico, por medio de sus propiedades de permeabilidad, porosidad y compresibilidad, ya que deben ser determinadas a las condiciones reales de presión y temperatura de saturación existentes en el yacimiento; estas propiedades se pueden estimar en el laboratorio empleando una muestra (núcleo) de la roca del yacimiento, pero los resultados obtenidos no son lo suficientemente confiables, principalmente porque la muestra representa una fracción infinitesimal con respecto al tamaño del yacimiento y los cambios que esta

pueda experimentar al pasar de condiciones de yacimiento a con condiciones de laboratorio son muy amplios y es por eso que este estudio se toma como una investigación para saber cómo esta - constituido el yacimiento.

Asimismo por medio de esta técnica se puede estimar la necesidad de estimulación del pozo; con los datos obtenidos del mismo pozo y con eso se puede comprobar si es necesario - el estímulo o no; además, se puede determinar el grado de comunicación (interferencia) entre los pozos.

Una vez detectado y clasificado el campo geotérmico y considerando las técnicas antes mencionadas, se procede a - la exploración del yacimiento mediante la perforación de dife- rentes pozos que servirán para inspeccionar la zona de inte- - rés, a fin de cubrir ampliamente el área geotérmica; estos -- pozos como son de poca profundidad permiten introducir instru- mentos de medición, cuyas lecturas servirán para determinar - el gradiente de temperatura horizontal o vertical; también se llevan a cabo mediciones para obtener la conductividad del te- rreno, cuyas muestras son examinadas inmediatamente después - de que son extraídas del pozo para evitar así alteraciones en los mismos pozos; con estas 2 características es posible cono- cer el flujo de calor en cualquier dirección del pozo perfora- do.

El objetivo principal que se busca con estas técni- cas o investigaciones, es el de explotar en forma óptima el -

campo geotérmico, donde el término óptimo en este sentido generalmente está relacionado con el punto de vista económico; además basándose en lo anterior se dice que la vida productiva de los yacimientos geotérmicos se desarrolla en forma continua durante la producción del campo geotérmico.

Con el fin de sustituir las fuentes convencionales de energía o disminuir el consumo de hidrocarburos, cada día un número mayor de países se interesan en la explotación de la energía geotérmica, considerada como una de las nuevas fuentes de energía de mayor trascendencia. Sin embargo, no es posible su amplio desarrollo, debido a la carencia de técnicos y científicos especializados, que actualmente son substituidos por ingenieros y técnicos de las más variadas disciplinas, entre los que se cuentan ingenieros mecánicos, eléctricos, químicos, físicos, geólogos, geofísicos, y geoquímicos, etc.

## 2.2.-Explotación geotérmica en México:

### (Explotación de la C.F.E.)

Como consecuencia del excesivo consumo que se está presentando en los hidrocarburos con respecto a su aplicación, se ha hecho necesario, para satisfacer la gran demanda eléctrica en el país, en el presente y para el futuro, buscar nuevas estrategias de producción y utilización a partir de otras fuentes

tes de energía, para cumplir con el gran déficit que se tiene sobre energéticos.

La Comisión Federal de Electricidad, inició sus exploraciones en Mexicali, B.C.N; en donde se encontraron yacimientos geotérmicos con predominio de líquido dominante (agua caliente) y es la zona geotérmica de mayor interés para nuestro país, que es la de Cerro Prieto, la que es reconocida como la perla negra de la geotermia; esta zona es desértica y se encuentra localizada en la provincia geológica llamada Valle Imperial.

La generación comercial de energía eléctrica se inició en 1973, y se trabaja en forma acelerada para incrementar la producción de la planta geotermoeléctrica que actualmente tiene en operación 4 unidades de 37.5 MW cada una, y una de 30 MW, que totalizan una capacidad de 180 MW instaladas; esta zona se denomina Cerro Prieto I. Pero entre los nuevos desarrollos geotérmicos que tiene la Comisión Federal de Electricidad es la de explotar una nueva zona llamada Cerro Prieto II, en la que se pretende alcanzar una producción de 400 MW de capacidad instaladas para 1984; en igual forma se pretende que para 1986 se tenga generada una capacidad de 620 MW instalada; esto será en una tercera zona llamada Cerro Prieto III.

Otra de las zonas geotérmicas que tiene en explotación y exploración la Comisión Federal de Electricidad es la de los Azufres, en el estado de Michoacán, en la cual se han

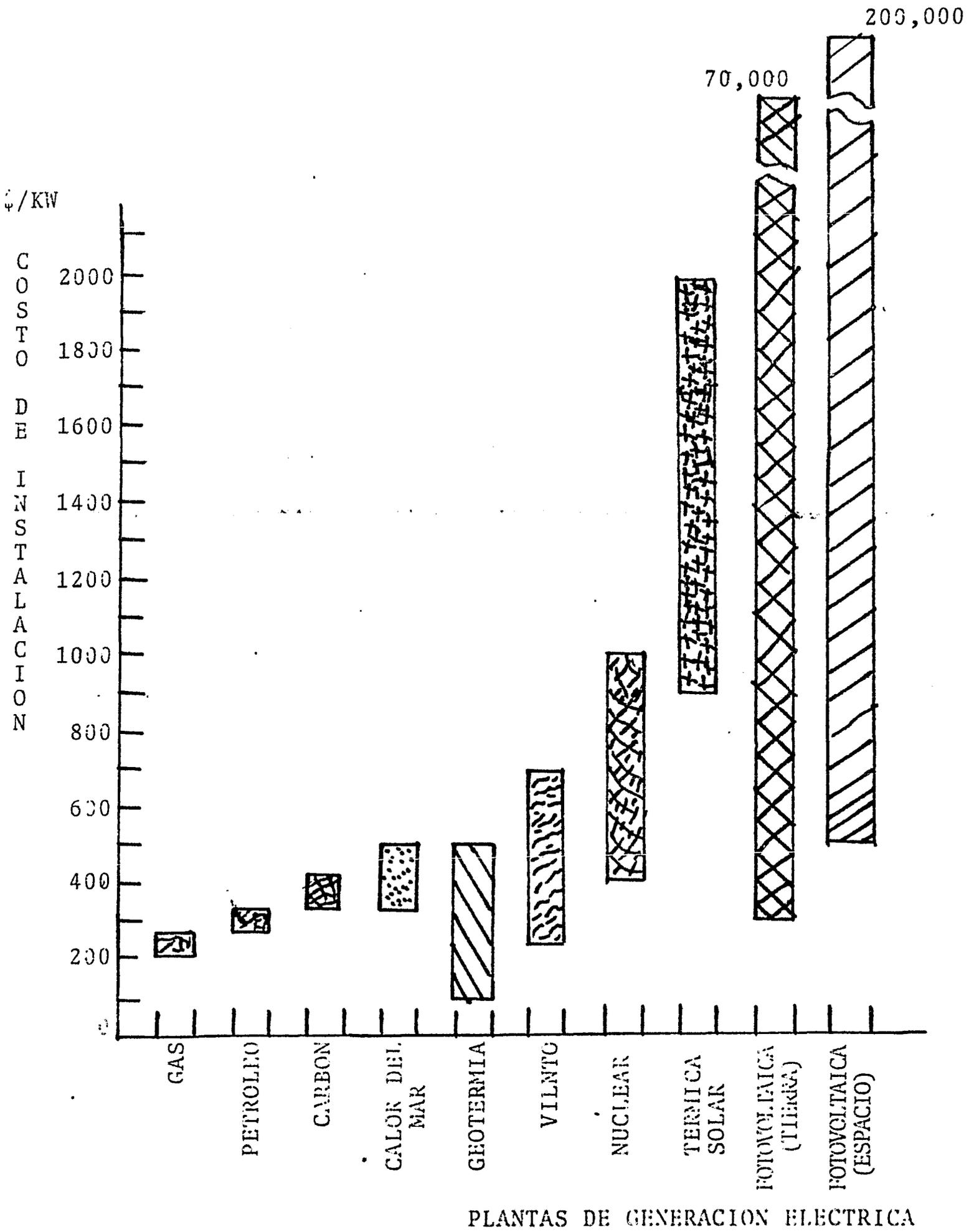
MEXICO RECURSOS HUMANOS EMPLEADOS EN NUEVAS  
FUENTES DE ENERGIA. (EN MESES-H)

AÑO	S O L A R		GEOTERMICA	BIOMASA Y OTRAS		EOLICA	OLAS	TOTAL
	CONVERSION FOTOTERMICA	CONVERSION FOTOVOLTAICA						
1980	702.9	336.6	378.8	65.5	49.4	8.4	1541.6	
1981	771.3	379.8	476.2	70.9	49.6	7.8	1755.6	
1982	785.4	472.0	473.1	98.8	51.2	8.4	1888.8	

MEXICO . DISTRIBUCION DE LOS RECURSOS HUMA-  
NOS ENTRE LAS NUEVAS FUENTES DE ENERGIA(EN %)

AÑO	S O L A R		GEOTERMICA	BIOMASA Y OTRAS		EOLICA	OLAS	TOTAL
	CONVERSION FOTOTERMICA	CONVERSION FOTOVOLTAICA						
1980	45.6	21.8	24.6	4.3	3.2	0.5	100	
1981	44.0	21.7	27.1	4.0	2.8	0.4	100	
1982	41.6	25.0	25.1	5.2	2.7	0.4	100	

(Fuente: Conferencia sobre las nuevas fuentes de energía en México,  
Oscar Guzmán, Colegio de México)



.Fig (2.4b)

COSTO ESTIMADO DE CAPITAL PARA PLANTAS DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA

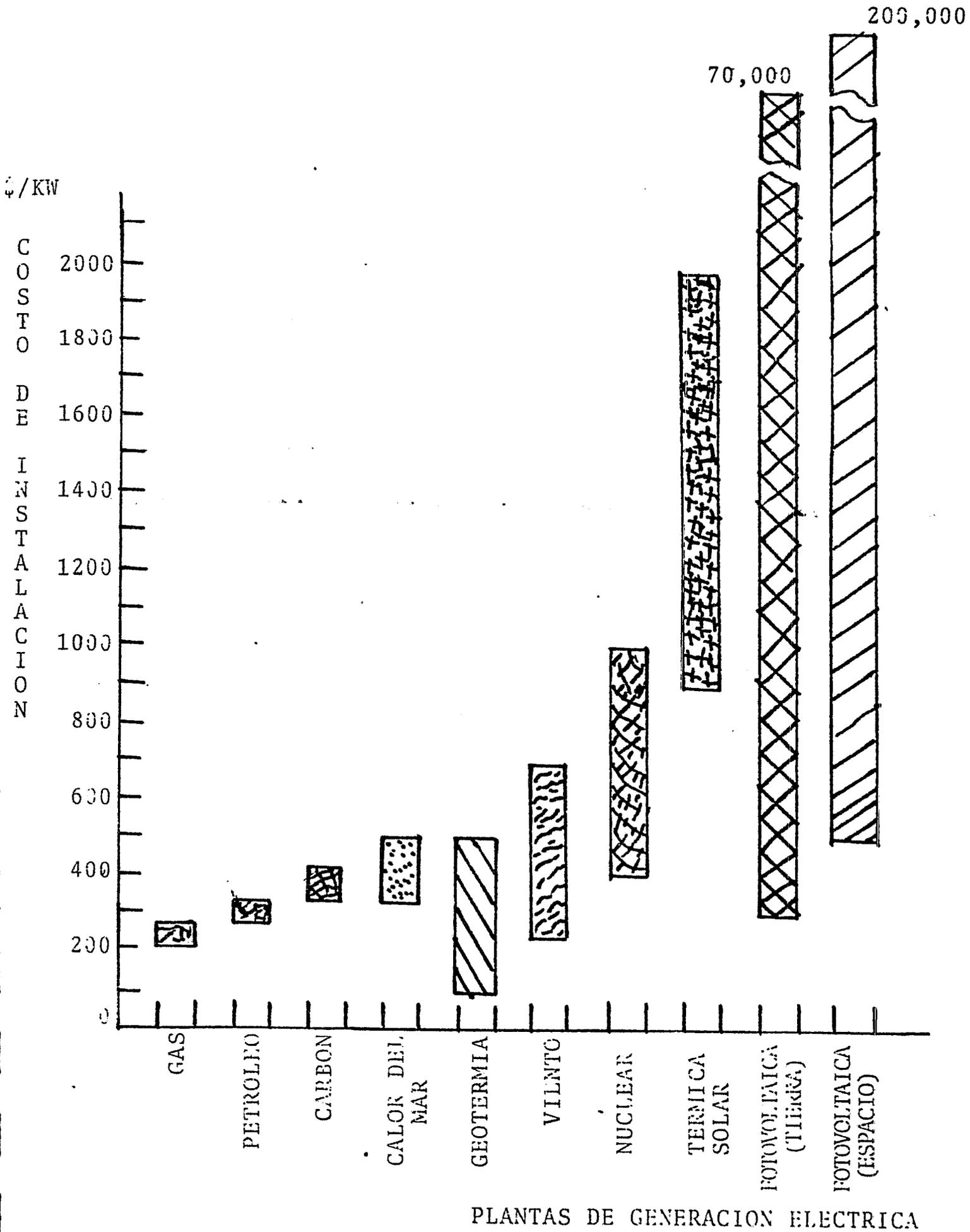


Fig (2.4b)

COSTO ESTIMADO DE CAPITAL PARA PLANTAS DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA

perforado 34 pozos profundos, obteniéndose resultados excelentes en varios sitios, inclusive se tienen pozos de vapor seco (vapor dominante). A finales de 1982, se pusieron en operación 5 unidades a boca de pozo de 5 MW cada una, y se tiene planeado instalar 2 plantas geotermoeléctricas de 55 MW antes de 1990. El potencial del campo se estima que será de 300 MW.

Los resultados excelentes de la operación de las plantas geotermoeléctricas de Cerro Prieto en Mexicali y la de los Azufres en Michoacán, han venido a constituir un estímulo para continuar vigorosamente en la búsqueda de más yacimientos geotérmicos, y se siguen encontrando ya cimientos en los estados de Michoacán, Jalisco, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Hidalgo y últimamente en el estado de Chiapas.

Con lo anterior se aprecia que los esfuerzos que realiza la Comisión Federal de Electricidad para aumentar su productividad de energía eléctrica son muy importantes, ya que van encaminados al ahorro de los hidrocarburos en nuestro país. Ver figuras (2.4a y 2.4b)

### 2.5 Problemas en los pozos geotérmicos:

El objetivo esencial de este análisis es describir en forma directa o indirecta uno o más problemas que se pueden presentar durante la explotación de los pozos geotérmicos. Se sabe que los yacimientos de vapor dominante (vapor seco) y el de líquido dominante (agua caliente) son los que ofrecen las

mejores características para la generación de energía eléctrica y que en el transcurso del aprovechamiento de la energía geotérmica de estos yacimientos se tienen problemas, que se describirán en forma breve posteriormente, y que después de esto, toda la energía aprovechada en el sistema será utilizada en las plantas geotermoeléctricas para ser aplicadas de acuerdo a las necesidades del lugar, donde se encuentre dicha planta.

Al estar efectuando la extracción de la energía geotérmica del subsuelo, en un yacimiento de líquido dominante (agua caliente) se extrae gran cantidad de agua que contiene sales y gases que provocan necesariamente cambios físicos en el reservorio, es decir, disminución de la temperatura, de la presión, y el nivel freático; además, se presentan cambios químicos, tanto en los pozos como en las manifestaciones superficiales de sus alrededores. Todo esto se debe a que estos yacimientos geotérmicos son técnicamente más difíciles que los de vapor dominante (vapor seco), ya que se requiere producir mayor cantidad de fluido para generar energía eléctrica; por esta razón se presentan mayores problemas de corrosión en las tuberías de revestimiento y de producción, mayores depositaciones de minerales por las salmueras explotadas, así como también corrosiones en las álabes de las turbinas.

En estos campos geotérmicos la base que predomina o que es continua es el agua, y el vapor, en caso de existir se

encuentra en forma aislada en las zonas de baja presión; para generar electricidad por medio de la energía almacenada en -- este tipo de campos se emplea el vapor que se separa del agua en la superficie a ciertas condiciones de presión, el cual se usará de acuerdo a la operación de las turbinas de las plan-- tas.

Este tipo de campos no posee un contenido de energía tan alto como el de vapor dominante (vapor seco), por lo que los problemas inherentes para su producción y su utilización en la superficie, con más complejos, originando que la energía aprovechada sea menor, principalmente cuando se alcanzan condiciones de flujo de 2 fase (agua y vapor) provocando con esto posibles depositaciones de sales que originalmente se en contraban disueltas en el líquido dominante (agua caliente), la cual produce una disminución en las condiciones originales de permeabilidad del yacimiento.

Para obtener la producción de energía geotérmica ne cesaria en el campo geotérmico de líquido dominante (agua caliente) el proceso es el siguiente; la mezcla de agua y vapor, se hace pasar por un evaporador - separador, donde parte del agua se evapora a una presión adecuada; por otro lado el agua remanente es separada y desechada, para que posteriormente el vapor generado se utilice en las turbinas. ver fig 2.5.

Se ha publicado poca información sobre campos geotérmicos de líquido dominante (agua caliente), pero se dispo-

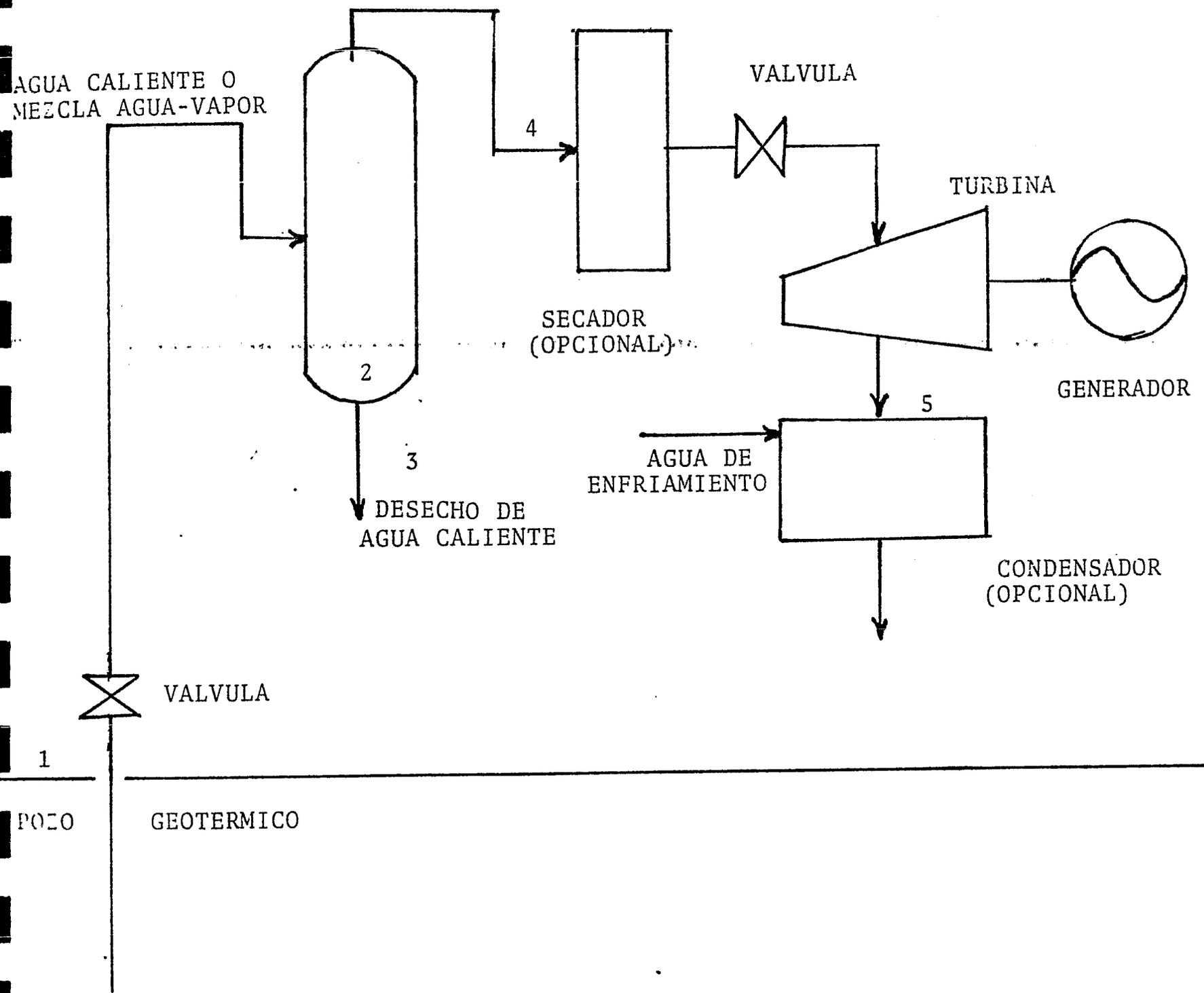


Fig (2.5) CICLO PARA UN YACIMIENTO DE LIQUIDO DOMINANTE (AGUA CALIENTE)

ne en la actualidad de datos sobre problemas técnicos encontrados durante las etapas de exploración y desarrollo efectuadas exclusivamente en Cerro Prieto, B.C.N; así como también de las soluciones adaptadas específicamente a esa zona geotérmica, - porque se desconoce el comportamiento de estos yacimientos -- bajo explotación en gran escala.

Durante la explotación de un campo geotérmico de vapor dominante (vapor seco), se tiene conocimiento de que su - existencia es circunstancial, porque se presentan cambios que favorecen la formación y la separación del vapor a grandes -- profundidades, requiriéndose necesariamente la existencia de agua.

Los estudios realizados a estos campos geotérmicos no han sido ampliamente desarrollados y no son muy efectivos dichos estudios, debido a que no existe una mayor aplicación y utilización de dichos campos; lo único que se ha realizado en la actualidad son estudios de uso de isótopos, inclusión de fluidos, solución y precipitación química, efectos de alta presión y temperatura en soluciones, migración de los fluidos, interacciones roca y agua y alteración de minerales. Con - - esto se han obtenido buenos resultados para proseguir en la - búsqueda de nuevos estudios o métodos que vayan encaminados a la explotación de estos campos geotérmicos.

Los campos geotérmicos de vapor dominante (vapor se co) son los que se buscan con mayor intensidad, debido a que

es una fuente de energía que no contamina el ambiente y con pocos problemas de producción y corrosiones en el sistema; -- además es más eficiente con respecto a la producción de energía geotérmica en comparación con los de líquido dominante -- (agua caliente).

Para obtener la producción de energía geotérmica necesaria en los campos geotérmicos de vapor dominante (vapor seco) su proceso es el siguiente: el fluido extraído del pozo geotérmico se obtiene en forma de vapor y es conducido hasta un separador, para eliminar las impurezas que arrastre y posteriormente se conduce hacia la turbina, ver fig 2.6.

Considerando de antemano lo anterior, y de acuerdo a las experiencias obtenidas en el transcurso de las exploraciones de los campos geotérmicos se tiene que tomar una decisión para el diseño de las plantas geotermoeléctricas para -- que cumplan con las necesidades reales y que sean de acuerdo a las características del yacimiento geotérmico en explota--ción, porque como se sabe se puede presentar el caso de que el equipo que se utilizó en una planta geotermoeléctrica no cumpla en otra planta, por las diferentes características que pueda tener un yacimiento geotérmico con respecto a otro yacimiento.

Con lo anterior se puede decir que la tecnología en plantas geotermoeléctricas esta iniciando su desarrollo y pasará algún tiempo para que se establezcan criterios de diseño,

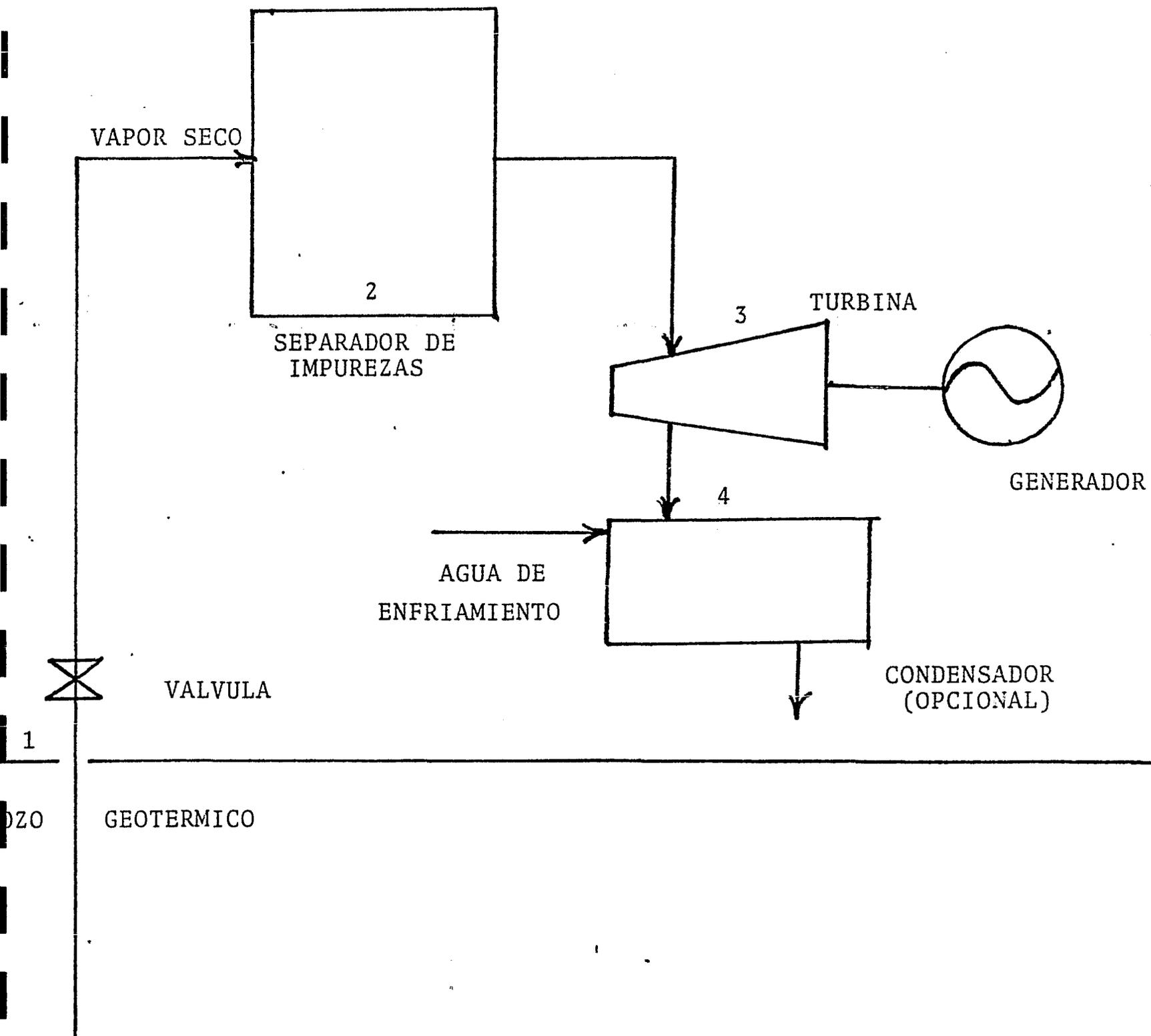


Fig (2.6) CICLO PARA UN YACIMIENTO DE VAPOR DOMINANTE (VAPOR SECO)

y aplicación general, y que muchos de esos criterios se deberán hacer considerando las experiencias que se han obtenido en otros campos geotérmicos.

2.4.-Representación de la gráfica del punto crítico:  
para un yacimiento:

Los yacimientos geotérmicos pueden clasificarse de acuerdo a la localización de su temperatura y presión inicial con respecto a un diagrama (presión-temperatura) para el agua. En la figura # 2.7; se muestra un diagrama de este tipo, en el que se señala el punto crítico del agua y otros 5 puntos que representan posibles condiciones iniciales para un yacimiento geotérmico.

En el caso de sistemas de líquido dominante la curva de saturación debe corresponder a una salmuera de composición igual a la del yacimiento; con objeto de simplificar la siguiente discusión se supondrá que no hay recarga de fluidos al yacimiento, es decir, la discusión se limitará al caso simple de un sistema cerrado.

El punto (A) corresponderá a un yacimiento cuyas condiciones iniciales se localizan en la fase vapor dominante; - el proceso de producción causado por la expansión del vapor es aproximadamente isotérmico.

El punto (B) corresponderá a un yacimiento cuyas con

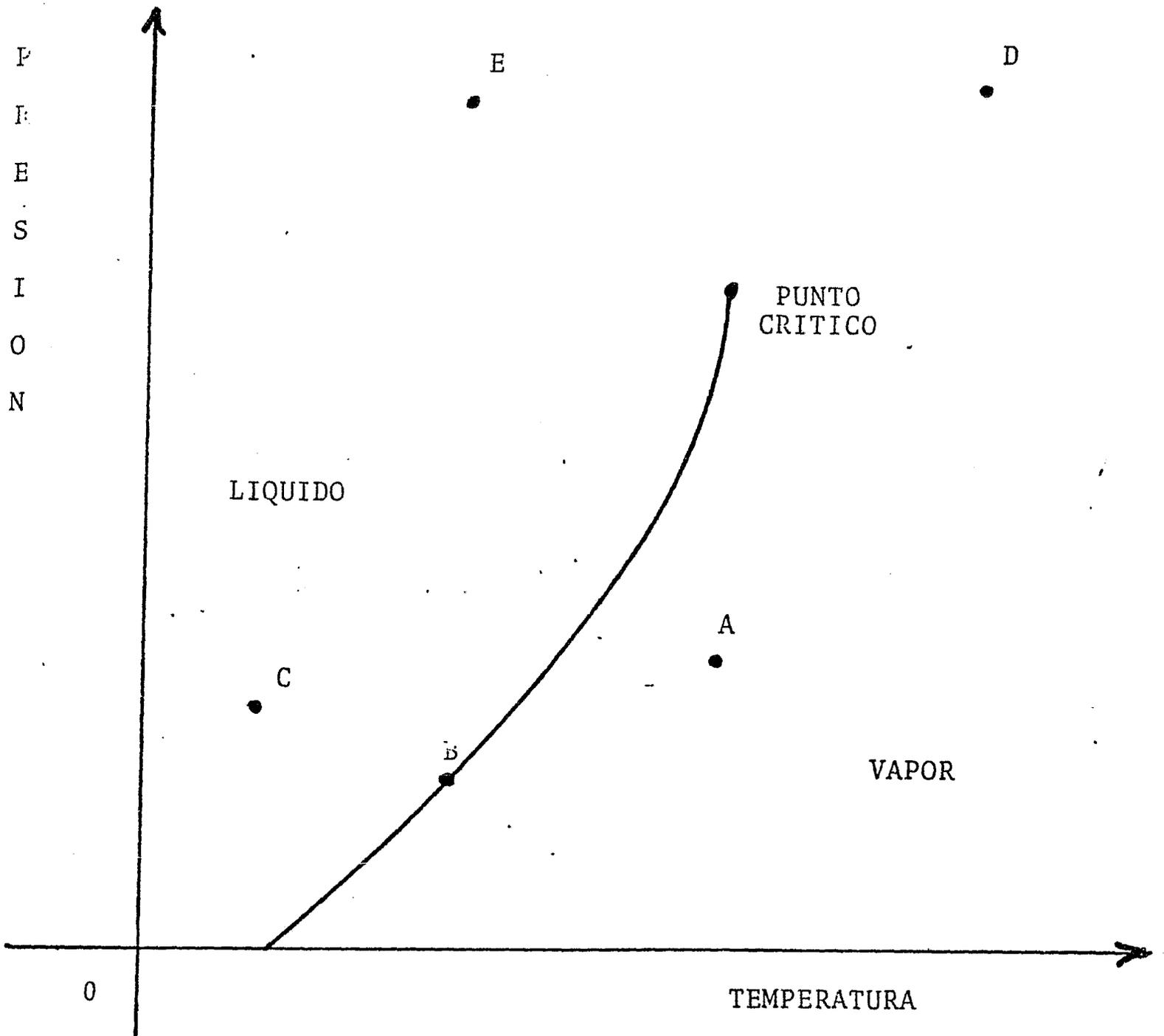


Fig (2.7) DIAGRAMA (P-T) PARA UN YACIMIENTO GEOTERMICO

diciones iniciales coinciden con la curva de presión de vapor; en este caso y dependiendo de las condiciones de presión y temperatura, la producción del yacimiento puede variar desde agua saturada con vapor a vapor saturado o cualquier mezcla de agua y vapor con una entalpía que va desde la del agua hasta la del vapor, a las condiciones específicas de presión y temperatura.

El punto (C) representa el caso en que un yacimiento geotérmico a condiciones iniciales contiene solamente líquido dominante; esta situación difiere de la discutida previamente para el punto (A) en que eventualmente al declinar la presión del yacimiento se alcanzarán condiciones que coinciden con la curva de presión de vapor. A partir de aquí el mecanismo de producción será similar al discutido para el punto (B); el flujo en el yacimiento para condiciones de presión superior a la presión de vapor es aproximadamente isotérmico, e isoentálpico.

El punto (D) está a una temperatura más elevada que la crítica, y representa un yacimiento geotérmico el cual, al declinar la presión, alcanzará condiciones similares a la del yacimiento de vapor cuyas condiciones iniciales están dadas por el punto (A). Un yacimiento geotérmico cuyas condiciones iniciales están dadas por el punto (D) representa condiciones de presión superiores a la presión crítica.

El punto (D) corresponderá a un yacimiento que al declinar la presión, como consecuencia de la producción del fluido tendrá eventualmente un mecanismo de producción semejante al discutido para los puntos (C) y (B).

### 3.- SUSTANCIAS DE TRABAJO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA:

Para aceptar una sustancia de trabajo que funcione de la manera más favorable para la aplicación o utilización de la energía geotérmica en el termosifón, nos basaremos primordialmente en las propiedades termodinámicas más aceptables de acuerdo a cada una de las sustancias presentadas, que estarán en función del rango de temperaturas esperadas en el fluido y en las propiedades químicas correspondientes; todos estos aspectos nos darán el verdadero comportamiento de la sustancia de trabajo.

Las siguientes sustancias, freón 12, freón 22 y el amoníaco, son las que se cree que deben utilizarse en el termosifón desde esos puntos de vista, que además pueden cumplir con las exigencias del estudio que se está realizando para el aprovechamiento de la energía geotérmica mediante tubos de calor o termosifón.

Refrigerante es cualquier sustancia capaz de absorber y disipar calor. El refrigerante debe poseer características físicas para que se pueda repetir en él la transformación de líquido a gas y de gas a líquido. Se requiere también que las transformaciones se realicen a la temperatura adecuada -- para los diferentes servicios, y a la presión conveniente, y que se relacionen de acuerdo a la economía, diseño, construc-

ción y operación de los equipos.

Otros factores del refrigerante son sus propiedades termodinámicas, químicas y de seguridad; y además se deben tomar en cuenta las características físicas del mismo.

El efecto de refrigeración de un refrigerante se mide por la cantidad de calor que es capaz de absorber desde -- que entra al evaporador como líquido hasta que sale como vapor; por lo tanto, los líquidos que poseen un alto calor latente de evaporación poseen un buen efecto de refrigeración; se puede decir, por lo anterior, que el efecto de refrigeración es la diferencia entre el calor que contiene el líquido y el calor contenido en el vapor después de pasar por el evaporador.

El punto de ebullición de un refrigerante a la presión atmosférica es básico al escoger el equipo requerido y el tipo de servicio para el que se va a usar. Un refrigerante ideal sería aquel cuya presión de evaporación fuera ligeramente mayor que la presión atmosférica, para que nunca existiera vacío en el sistema.

Los refrigerantes deben ser de tal naturaleza que los continuos cambios de presión y temperatura no afecten sus propiedades; asimismo, deben resistir la descomposición química ocasionada por contaminación con el aire, el aceite o el agua.

Existe el peligro de la intoxicación de la que hay

que tener cuidado debido a la gran posibilidad de fuga que -- puede haber en los sistemas de refrigeración. Casi todos los fluidos son tóxicos con excepción del aire. El grado de toxi ci dad varía de uno a otro y depende de sus características y del tiempo en que se esté expuesto a los mismos. Debe tenerse en cuenta el grado de toxicidad, que muchas veces es decisivo, al escoger el refrigerante. Bajo el punto de vista de seguridad, un refrigerante no debe ser inflamable ni explosivo, ya que las fugas pueden alcanzar una concentración crítica y causar incendios o explosiones.

Un buen refrigerante debe poseer buenas características que permitan detectar una fuga; algunos refrigerantes - tienen más capacidad para fugarse que otros; mientras más den so es un refrigerante menor es su posibilidad de fuga. Cuando la presión es menor que la atmosférica la fuga es en sent ido contrario y las consecuencias son de tipo térmico, dis minu y endo la eficiencia térmica; la fuga provoca pérdidas costosas de refrigerantes, peligro, baja eficiencia, etc.

Cada refrigerante tiene su sistema para la detec ci ón de la fuga. Cuando hay fugas los refrigerantes olorosos se detectan con facilidad, pero en ciertos casos algunos olores no se pueden permitir.

El costo de un refrigerante en unidades pequeñas no es de mucha importancia. Lo contrario sucede en instalaciones grandes; el costo se debe de analizar bajo el punto de vista

de la eficiencia térmica y no simplemente del costo por peso. El refrigerante que absorbe o cede calor al mínimo costo es el más económico, sin importar el costo por peso. Otro factor que debe tenerse en cuenta al seleccionar un refrigerante en un momento dado es el factor determinante o sea su disponibilidad.

Los refrigerantes que se usarán en este trabajo serán los siguientes, y se presentan de acuerdo a sus compuestos químicos:

A).- AMONIACO ( $\text{NH}_3$ ): El amoniaco posee mucha de las ventajas de un magnífico refrigerante; por eso, muchos operadores y fabricantes lo prefieren. El amoniaco es el refrigerante más antiguo y de más uso por sus características térmicas y físicas, es muy eficiente, económico y no requiere equipo pesado para su manejo, es químicamente estable, no afecta al lubricante y pesa la mitad del aire; prácticamente no se mezcla con el aceite, ni reduce su viscosidad. Cuando hay humedad el aceite y el amoniaco forman una emulsión que causa dificultades; el amoniaco tiene alto calor específico del líquido pero también es alto el calor específico del vapor, tiene muy alto efecto de refrigeración, es vóltatil, no se quema a las temperaturas ordinarias sino solo cuándo se expone a una llama abierta o cuando se combina con cierta proporción de aire, y si se comprime forma una mezcla explosiva que es más grave si en la mezcla también existe vapor de lubricante;

es muy irritante a las membranas mucosas y a los ojos. Se le puede detectar fácilmente por el olor y con velas de sulfuro, causa humos que al combinarse con el amoníaco producen nubes blancas. En presencia del agua ataca a metales no ferrosos, por eso nunca se usa con bronce o cobre. Sus límites de temperatura están entre  $-62^{\circ}\text{C}$  y  $32^{\circ}\text{C}$  que corresponden a presiones de  $0.130\text{ Kg/Cm}^2$ . y  $20\text{ Kg/Cm}^2$  respectivamente; tiene un calor latente excepcionalmente alto, arriba de  $500\text{ Btu/Lb}$ , y una temperatura crítica alta, de valor de  $-132^{\circ}\text{C}$  a una presión de  $117\text{ Kg/Cm}^2$ .

B).- DICLORODIFLUOROMETANO ( $\text{CCL}_2\text{F}_2$ ) o refrigerante 12: El refrigerante 12, conocido comunmente como freón 12 o -genetrón 12; es muy usado en los sistemas de aire acondicionado. El refrigerante 12 es uno de los llamados refrigerantes hidrocarburos -halógenos (halocarburos). La gama de presiones de este refrigerante es moderada y su calor latente es bajo, de 50 a  $85\text{ Btu/Lb}$ .

En general un sistema que ha sido diseñado para un refrigerante, no trabajará bien para otro sin hacerle algunas modificaciones. Este refrigerante es químicamente estable y casi no tiene efectos corrosivos sobre metales ordinarios a menos que estén contaminados por impurezas. Como el agua no es combustible aunque en la presencia de flamas abiertas o de superficies muy calientes se descompone y forma gases tóxicos, el vapor en sí mismo casi no es tóxico, hasta concentraciones

arriba del 20% por volumen de aire. Aparentemente su única desventaja es la de reducir la cantidad de oxígeno; tiene solo olor muy ligero.

En muchos casos antes de empezar a trabajar el sistema, se hace un alto vacío sobre el sistema caliente para evaporar (secar) cualquier humedad.

C).- MONOCLORODIFLUOROMETANO ( $\text{CCLHF}_2$ ) o refrigerante 22: el refrigerante 22, también conocido como freón 22 y como genetrón 22 (anteriormente genetrón 141), al igual que el refrigerante 12, es químicamente estable, casi sin olor, no es irritante y no presenta efectos nocivos permanentes en concentraciones hasta de 18% por volumen para exposiciones de menos de 2 horas de duración. Este refrigerante es particularmente útil para campos de bajas temperaturas porque su presión es más alta que la del amoníaco. Tiene temperatura crítica de  $95^\circ \text{C}$  a una presión de  $50 \text{ Kg/CM}_2$ .

Se ha mencionado que un refrigerante puede ser cualquier sustancia estable no corrosiva con características apropiadas en la fase líquido-vapor para servir satisfactoriamente en la gama de temperaturas necesarias en el evaporador-condensador. Los medios actualmente usados deben, asimismo, satisfacer otros criterios como disponibilidad, costo, baja toxicidad y gama de presiones.

Las propiedades de un refrigerante o de cualquier sustancia termodinámica pueden presentarse con ventaja trazan

do sus valores característicos en diagramas. Son de uso común los planos temperatura-entropía ( $T - S$ ), el de presión - entalpía ( $P - h$ ), y menos frecuente el de presión - volumen ( $P - V$ ) y el de entalpía - entropía ( $h - S$ ). En muchos casos las propiedades de un líquido se determinan con la entalpía y el volumen específico y estos valores se pueden obtener en tablas a las temperaturas indicadas y son independientes de la presión.

No existe un refrigerante ideal y aun cuando se encontrara alguna sustancia química ideal como refrigerante, difícilmente podrá cubrir totalmente las necesidades exigidas por el hombre; por lo tanto cualquier refrigerante deberá poseer las más de las siguientes características o propiedades:

A).- No tener presiones de condensación excesivas, de tal modo que no sea necesario tener instalaciones extrafuertes.

B). Bajo punto de ebullición a la presión atmosférica, de tal modo que el sistema no necesite operar a condiciones de vacío con la posibilidad de entrada de aire al sistema.

C). Alta temperatura crítica, lo que hace posible licuar (condensar) un vapor a una temperatura mayor que la temperatura crítica, no importando qué tanto sea elevada la presión.

D). Alto calor latente de vaporización; mientras más alto sea el vapor del calor latente, se necesitará circular menor cantidad de refrigerante por unidad de capacidad y -

de tiempo.

E). Bajo calor específico del líquido.

F). Bajo volumen específico del vapor.

G). Ausencia de acción corrosiva en los metales --  
usados; esto es indispensable.

H). Estabilidad química, la que es esencial.

I). Debe ser no inflamable y no explosivo.

J). No debe ser tóxico a los pulmones, ojos y en -  
general a la salud.

K). Fácil localización de fugas por olores o por -  
indicadores apropiados, lo que es una característica importante  
te.

L). Disponibilidad, bajo costo y fácil de manejar,  
son obviamente características muy deseables.

M). Es necesario tener transferencia satisfactoria  
de calor y adecuados coeficientes de viscosidad.

N). El punto de congelación del líquido deberá ser  
apreciablemente menor que para cualquier temperatura a la cual  
deba trabajar el evaporador.

#### 4.- DESCRIPCION DE LOS TUBOS DE CALOR

##### 4.1.-Características de los Tubos de Calor

El tubo de calor es un dispositivo recientemente desarrollado que sirve para transportar eficientemente la energía térmica; es un sistema con muy alta conductividad térmica y se asemeja a un superconductor en sentido térmico, porque es posible transmitir grandes cantidades de calor a través de una diferencia de temperaturas dada.

La estructura del tubo de calor es muy simple y relativamente económica, comparada con otros dispositivos o instrumentos que se emplean en el aprovechamiento de la energía térmica; además, es insensible al campo gravitacional y silencioso en su operación.

Su estructura es la siguiente: es cilíndrico, alargado y puede tener diversas formas de acuerdo al diseño. Tiene un tubo contenedor o pared del líquido; en esta parte se encuentra la estructura capilar porosa o no porosa y además la sustancia de trabajo y la pared de vapor. Básicamente constará de dos partes, que son el evaporador y el condensador.

Se dirá que es un sistema cerrado porque la masa del vapor generada a causa de la energía transferida dentro del sistema en la sección del evaporador, debe ser igual a la masa del vapor condensada proporcionada por la energía transferida al sistema que es expulsada o rechazada a través de la sección

del condensador; es decir, la masa solo sirve como medio de transporte de la energía de un extremo al otro del tubo de calor y las propiedades de esta masa, también pueden cambiar -- con relación al tiempo y a su energía.

El tubo de calor no está restringido a la posición que se le pueda dar al evaporador, y puede ser utilizado en cualquier postura deseada; si se presentara el caso de que -- cambiara su posición, por ejemplo, si la región del evaporador estuviera en la posición más baja, lo que se presentaría es que las fuerzas de gravitación asistirían a las fuerzas de capilaridad en el retorno del fluido desde la sección del condensador hasta la sección del evaporador. Ver fig (4.1)

El tubo de calor es un instrumento capaz de transmitir calor entre dos terminales (evaporador y condensador) a través de considerables distancias y con pequeñas diferencias de temperaturas de acuerdo con la Ley de Fourier, y debido -- también a las diferencias de entalpías que se tienen en el -- sistema.

El funcionamiento del tubo de calor es de la siguiente manera; internamente se saturará o llenará con una sustancia de trabajo para el máximo aprovechamiento de la energía térmica y de acuerdo a las condiciones del lugar donde se instalará dicho tubo. Algunas de estas sustancias son: freón 12, freón 22 y el amoniaco; esta sustancia transportará energía térmica de una parte llamada evaporador a otra llamada conden

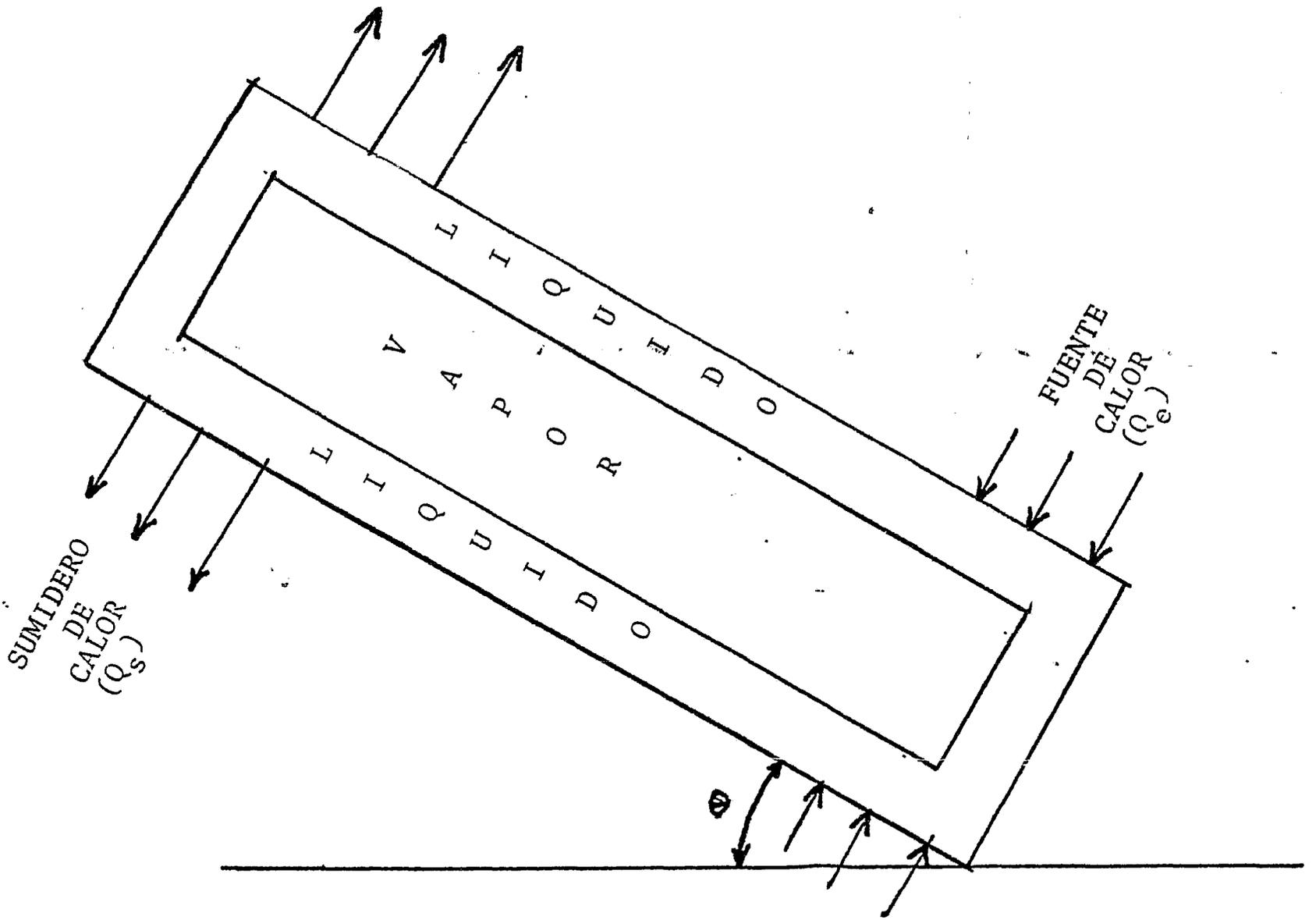


Fig (4.1) TUBO DE CALOR INCLINADO

sador.

La Sección del evaporador estará sometida a una -- fuente de energía térmica, dando motivo con esto a que el -- fluido de trabajo se vaporice en esa sección, y que el vapor fluya por el centro del tubo; la diferencia de presión que se produce hace que el vapor circule desde la sección del evaporador hasta la sección del condensador, en donde se condensa por medio de una fuente externa; el condensado retorna por el tubo contenedor o pared del líquido que puede estar formado -- por una estructura capilar porosa o no porosa hacia la parte caliente o sección del evaporador. Dicho retorno puede reali-- zarse por acción capilar o por acción de la gravedad o ambos.

El agotamiento del líquido debido a la evaporación es el que provoca la superficie de la interfase líquido - vapor en la pared del líquido donde se encuentra la estructura capilar, circunstancia que a su vez origina la presión capilar, la cual hace que el líquido condensado regrese de la sec-- ción del condensador a la sección del evaporador a través de la estructura capilar para que nuevamente se inicie el ciclo.

La cantidad de calor latente de evaporación es muy grande en comparación con el calor sensible transportado por un sistema convencional cuyo proceso de transporte básico sea la convección.

Debido a que las variaciones internas de presión y

del vapor son normalmente pequeñas, entonces se dirá que el tubo de calor puede operar casi a la condición isotérmica - - - ( $T = \text{cte.}$ ) y muy cerca de la temperatura de saturación del vapor correspondiente a la presión del vapor; por eso se dice - que el tubo de calor posee conductividad térmica extremadamente alta.

No obstante que el tubo de calor es un dispositivo de muy alta conductividad térmica, para desarrollar la teoría ~~de los tubos de calor se han utilizado las leyes de mecánica~~ de fluidos, de transferencia de calor y de termodinámica, por eso se dice que se presentarán problemas en el diseño de los tubos de calor con respecto a las limitaciones sobre la transferencia máxima de calor que puede alcanzar este. Estos límites pueden ser:

1).- Límite capilar; la presión capilar necesaria - para que exista recirculación del fluido de trabajo y del flujo de vapor.

2).- Límite sónico; la velocidad del vapor, con limitaciones en el flujo del vapor.

3).- Límite de arrastre por penetración; la precipitación del líquido en la superficie de la interfase líquido - vapor por la fluencia del vapor a cierta velocidad.

4).- Límite de ebullición; la turbulencia generada por la ebullición en la pared del líquido o tubo contenedor - donde se encuentra la estructura capilar.

5).- Otros factores que intervienen en el funcionamiento del tubo de calor son las temperaturas de la fuente externa y del sumidero de calor, así como también las condiciones en la superficie de contacto entre la pared del tubo contenedor o pared del líquido y la fuente externa de calor y entre el sumidero de calor.

En la fig 4.2 se ilustran gráficamente los límites anteriores.

#### 4.2.-Historia y Teoría de los Tubos de Calor.

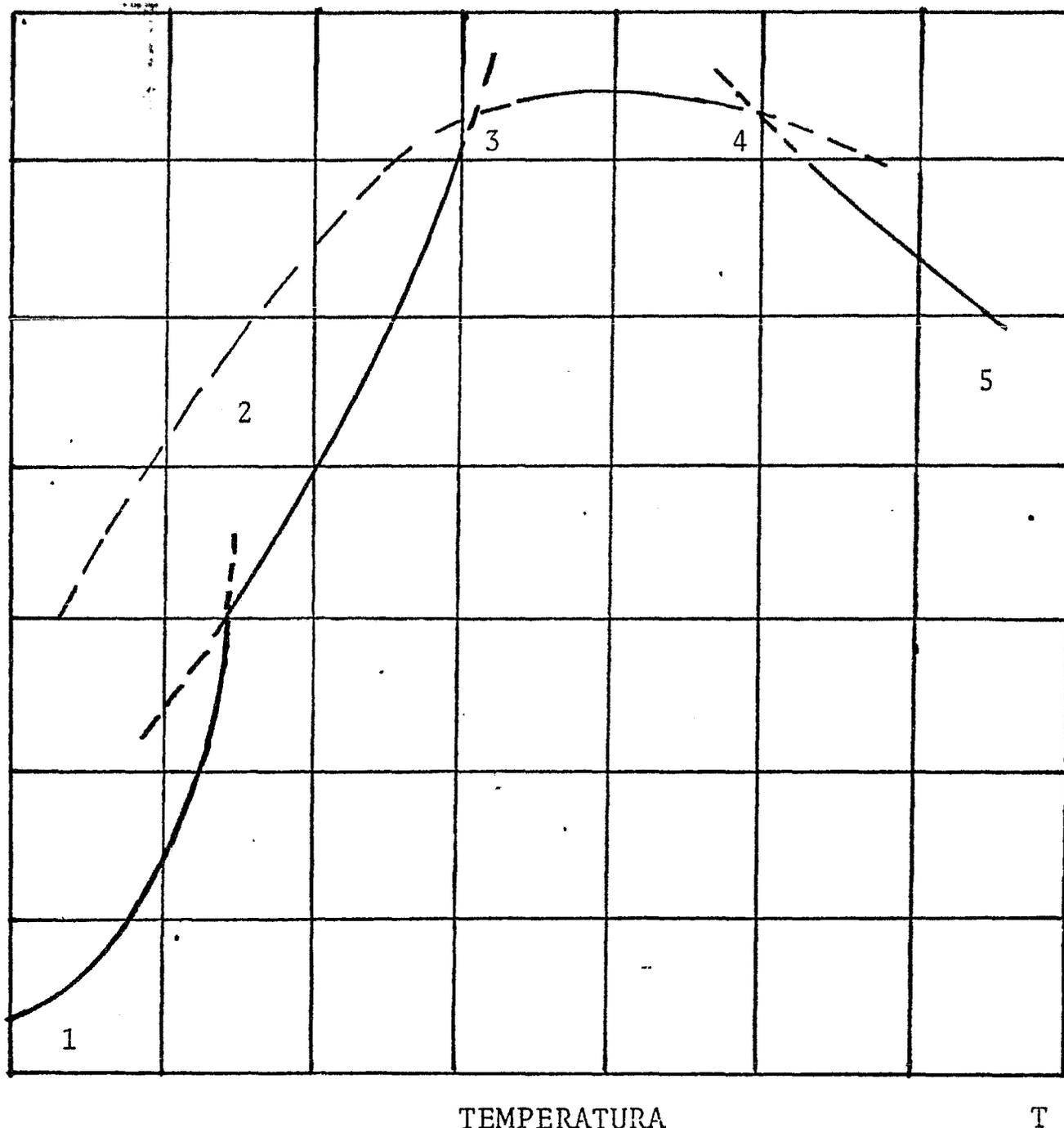
El concepto del tubo de calor fue introducido por James A. Trane de la siguiente manera: un vapor fue introducido a presión a un sistema de calentamiento, obteniéndose ganancia de calor. La transferencia de calor obtenida con el vapor permitió conseguir una conductividad muy alta y una respuesta rápida en el sistema. Típicamente el sistema realizado por James A. Trane es de la siguiente forma: está constituido por una bomba de vacío, un eliminador de aire, trampas de vapor y línea para el retorno del condensado. Este sistema fue aceptado hasta 1920. El siguiente precursor que trató el tubo de calor fué R. S. Gaugler (General Motors) en la época de 1945-1948, quien trabajo sobre un sistema para transferir calor por medio de capilaridad para aparatos de refrigeración.\*

Sorprendentemente se le había puesto poca atención

\* Ver la lista de referencias bibliográficas al final del trabajo.

T R A N S F E R E N C I A  
D E . C A L O R

Q



TEMPERATURA

T

LIMITE SONICO

1 - 2

LIMITE DE ARRASTRE POR PENETRACION

2 - 3

LIMITE VISCOSO O CAPILAR

3 - 4

LIMITE DE EBULLICION

4 - 5

Fig (4.2)

GRAFICA DE LIMITES

a las modificaciones que se le estaban realizando al tubo de calor básico, pero hacia finales de 1960 se comenzaron a efectuar dichas modificaciones que estaban orientadas a buscar un mejor diseño del tubo de calor para obtener una alta capacidad térmica. Desde esta época y hasta la fecha se están sacando artículos técnicos que hablan sobre los tubos de calor, pero donde se dedica mayor interés es en obtener la máxima eficiencia térmica que se cree que es el objetivo más importante, sin prestar mucha atención a los diferentes modos de operación o funciones especiales a que se destine.

Las características primarias más importantes son las siguientes: conductividad térmica extremadamente alta (muchas veces superior a la capacidad de transferencia de los metales), capacidad para separar la fuente de calor y el receptor a distancias considerables, aplanamiento de la temperatura (manteniendo condiciones de temperaturas uniformes en una gran área de superficie, sin importar las variaciones de punto a punto en las temperaturas de la fuente de calor), transformaciones del flujo de calor (el calor puede ser concentrado o dispersado ya sea siendo añadido en una pequeña área a un alto flujo y removido a una área a un bajo flujo o viceversa); estas son algunas características que debe poseer y que dependerán de las aplicaciones a que se asignen, aunque se han demostrado que pueden ser utilizados en una infinidad de aplicaciones para el aprovechamiento de la energía.

Las ventajas del tubo de calor pueden ser mejor logradas o aprovechadas cuando es largo, delgado y con una longitud bien definida; transporta calor con una caída de presión despreciable entre el evaporador y el condensador, de tal manera que la sección media es casi isotérmica; sin embargo, no necesita ninguna temperatura de operación en particular, lo que quiere decir que ajusta su temperatura para adaptarse a las condiciones de la fuente de calor y el receptor de calor; además, es un dispositivo térmico que permite la transferencia de cantidades muy considerables de calor a través de pequeñas áreas de superficie, el transporte de calor en considerables cantidades que se acompaña de la circulación de pequeñas cantidades de fluido de trabajo; esta circulación requiere de pequeñas diferencias de presión y temperaturas, resultando en una conductividad térmica es muy grande; el transporte total de calor puede incrementarse solo si la fuerza de origen capilar puede sostener la circulación requerida del fluido.

En numerosas aplicaciones es deseable mantener un rango estrecho de temperaturas en la sección media del tubo de calor, sin importar las variaciones en las condiciones en que se encuentra la fuente o receptor. En estos casos es necesario tener controlado activa o pasivamente la conductividad térmica del tubo de calor para que mantenga rango de temperaturas deseadas; en este caso se le llamara tubo de calor

a temperatura constante.

Esta constituido de la siguiente forma; un tubo contenedor o pared del recipiente, de longitud especificada por el diseñador, radio exterior de la pared del recipiente o tubo contenedor, radio exterior que corresponde al líquido circulante de la estructura capilar porosa y el radio interior - que forma la región del vapor circulante. Se considera también como un artificio que involucra transición de la fase líquido y vapor, opera entre rangos de temperaturas con el punto triple termodinámico y el punto crítico del fluido de trabajo. Ver figura (4.3)

El funcionamiento es básicamente de la siguiente -- forma; el calor es añadido o removido a través de la pared - del recipiente o tubo contenedor, por conducción térmica ordinaria; debiera ser tan estrecha como las condiciones lo permitan con el fin de minimizar las diferencias actuales de la temperatura, la pared del recipiente o tubo contenedor deberá por supuesto absorber las diferencias que existen entre la temperatura ambiente y la temperatura interna del tubo de calor.

Trabaja a una presión interna de vapor muy baja y - mejora la operación al incrementarse las presiones; considerando las características de diseño es posible adaptar la presión ambiental mediante la elección de un fluido de trabajo con una presión de vapor adecuada a la temperatura de operación deseada.

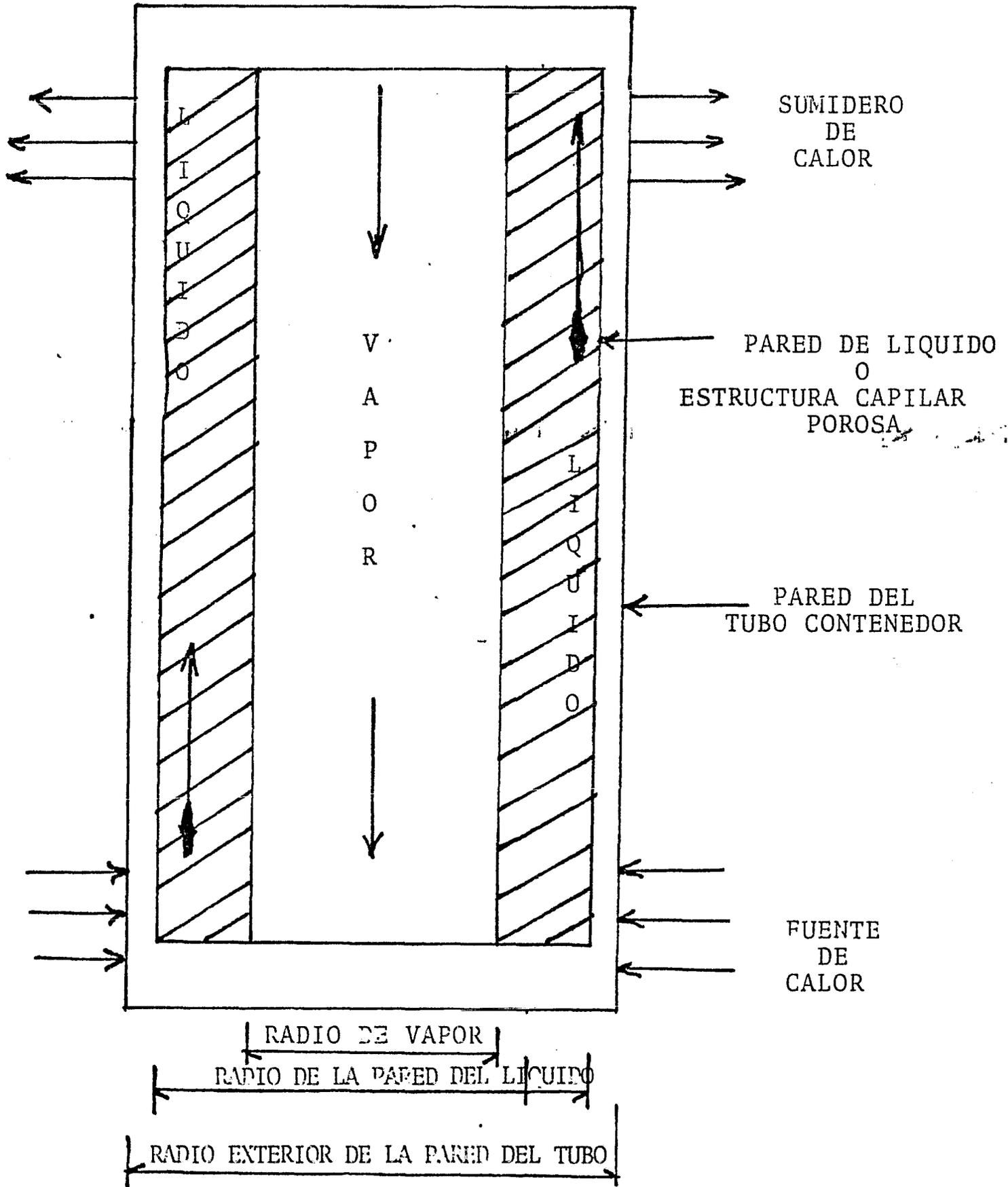


Fig (4.3) TUBO DE CALOR CON ESTRUCTURA CAPILAR POROSA

La estructura capilar por donde debe fluir el líquido que está en constante movimiento, no es indispensable que este colocada contra la superficie interior de la pared del recipiente, pero para que exista una mayor movilidad del fluido de trabajo obviamente es la mejor posición, ya que la evaporación y condensación se forma en la interfase vapor-líquido; esto hace que la estructura capilar ocurra una transferencia de calor a través del medio de mayor conductividad térmica. La estructura capilar estará caracterizada por su radio promedio de poro, por su permeabilidad y la fracción del volumen del líquido. Además, en el tubo de calor la interfase vapor-líquido bajo algunas circunstancias puede desarrollarse en la superficie de la pared del líquido o aún por sobre esta. Si en este caso existiera suficiente líquido entonces la fuerza gravitacional domina a la tensión superficial y en este caso la interfase vapor-líquido sea considerablemente grande.

La temperatura y presión existente en la interfase vapor-líquido se elevan considerablemente en el evaporador -- para que posteriormente se aprovechen en el condensador. Esto se origina por diferencias de presión en el vapor; la diferencia de presión existente en el vapor es algo menor que la diferencia de presión en la interfase vapor-líquido.

Al mantenerse la evaporación continua, la presión -- en la interfase vapor-líquido debe exceder a la presión que --

se encuentra en el vapor adyacenté en el evaporador, en igual forma para que se mantenga la condensación continua, es necesario que la presión que se tiene en el vapor condensado debe exceder a la presión de vapor en el líquido adyacente; entonces, de acuerdo a la distribución de presión que existen en el tubo de calor, el líquido cambia de dirección, considerando que el líquido se conduce del condensador al evaporador.

Por lo general la mayor diferencia de presión ocurrirá al principio de la sección del evaporador, o sea, cuando la longitud se encuentre en cero, estara preparado con una pared de líquido completamente saturado, pero existirá una mayor limitación en el flujo local de calor de la sección evaporadora; el líquido que se encuentre en el interior de la pared puede estar sobrecalentado; al llegar este líquido al extremo del evaporador, se presentará un hervimiento y el líquido pasará a ser vapor. En esta región se alcanzan las condiciones más elevadas de temperatura y presión.

La formación de burbujas es debido a los hervimientos que se presentan en el tubo de calor. Estas burbujas dependen de la naturaleza y geometría de la interfase vapor - líquido, que es donde se genera la burbuja; si la diferencia entre la presión de vapor en la burbuja y la presión en el líquido que la rodea es menor, entonces la burbuja se colapsará. En la formación de una burbuja la presión de vapor no puede exceder a la presión de equilibrio de vapor y del líquido a

la temperatura dada.

Para saber el comportamiento del tubo de calor es indispensable tener conocimiento de las ecuaciones de conservación de la masa o continuidad, de movimiento o momentum, y la de energía; con estas ecuaciones se puede obtener la distribución del flujo de energía, flujo de materia, características de la temperatura y presión. Con estas ecuaciones se definen las relaciones básicas de trabajo en el tubo de calor.

Es necesario, pero no indispensable, que el tubo de calor se encuentre lleno de fluido de trabajo, para asegurar que moje todas las paredes de la estructura capilar, quedando mojada de acuerdo al ángulo de inclinación que se le dé; es deseable también que el fluido de trabajo moje la pared del recipiente, ya que esto mejorará la transferencia de calor.

Las transformaciones o cambios iniciales que se presenten cuando se usan sustancias de trabajo es algo muy importante, y más cuando se sabe que se convertirán en el fluido de trabajo; y que además, se encuentren por debajo de su punto de fusión; es por eso que se dice que conforme se le agrega calor a la sección del evaporador la sustancia de trabajo que se encuentra ahí va acercándose a la temperatura de evaporación y llega el momento que la supera, formándose vapor, el cual se desplaza o se mueve por la pared de vapor hasta la sección del condensador; la sustancia de trabajo adyacente que se encuentre en la sección del evaporador se calienta hasta

llegar a su punto de evaporación en forma parcial por la condensación del vapor en su superficie y por la conducción del calor en la pared del tubo de calor y en la pared del líquido entonces, la zona de evaporación se moverá a la sección del condensador.

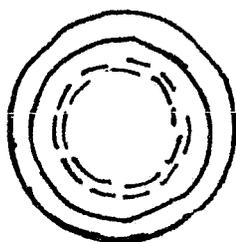
Como se sabe cuál es la forma del tubo de calor, -- dentro de él existirán gradientes de presión promedio que serán inversamente proporcionales al área del flujo, donde se puede suponer que tanto la velocidad del flujo y la presión en el líquido dependerán solamente de la longitud del tubo de calor.

Las intensas investigaciones que se realizaron en el tubo de calor dieron como resultado una gran variedad de aplicaciones en la ingeniería. Entre las aplicaciones más notables deben mencionarse el control térmico dentro de los aparatos espaciales, sistemas electrónicos de enfriamiento, aplicaciones térmicas comerciales ordinarias, transferencia de calor en cámaras de vapor, enfriamiento de los trajes espaciales, circuitos integrados, estabilización de temperaturas en electrónica y generadores de energía termoeléctrica.

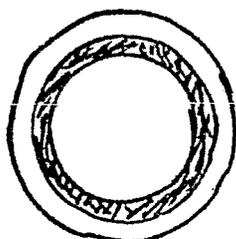
5.- APLICACION POSIBLE A MANTOS GEOTERMICOS DE LOS TUBOS DE CALOR:

En el manejo de la energía térmica para diversos -- usos es necesario buscar nuevas técnicas o métodos para suplir o complementar las ya existentes. Una de esas técnicas o métodos fué el tubo de calor que en un principio se aplicó en procesos industriales, trajes espaciales, estabilización de temperaturas en electrónica, etc. En este trabajo se analiza la aplicación de estas estructuras de transmisión de calor en la extracción de la energía interna de mantos geotérmicos, -- donde la extracción de vapor del mismo suele ser conflictiva.

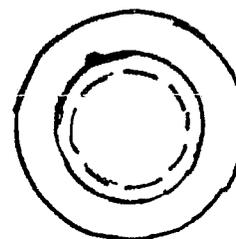
La idea original del tubo de calor consiste en una zona de evaporación y otra de condensación (aquí se aprovecharía la energía extraída), y el retorno del fluido se efectúa por acción capilar; además, el tubo de calor puede o no tener una estructura porosa. En un tubo de calor se tiene un flujo de vapor y flujo de líquido (ver figs 5.1, 5.2 y 5.3)



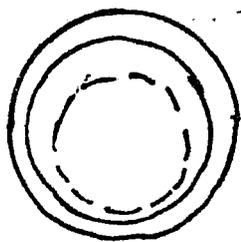
FILTROS, REDES  
(MALLA DE ALAMBRE)



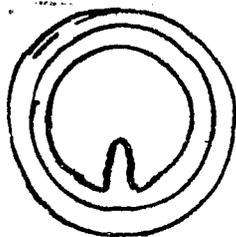
METAL SINTERIZADO



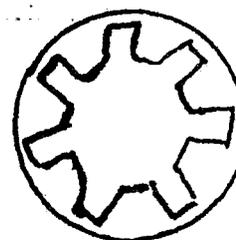
ANULARES



DESCENTRADAS

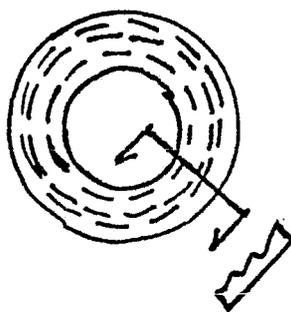
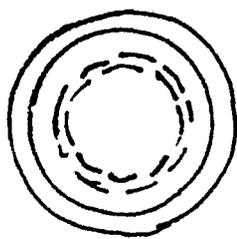


ARTERIALES



ESTRIAS

HOMOGENEAS



COMPUESTOS

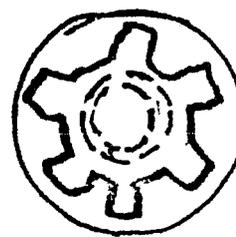


Fig (5.1)

ESTRUCTURAS CAPILARES PARA EL TUBO DE CALOR

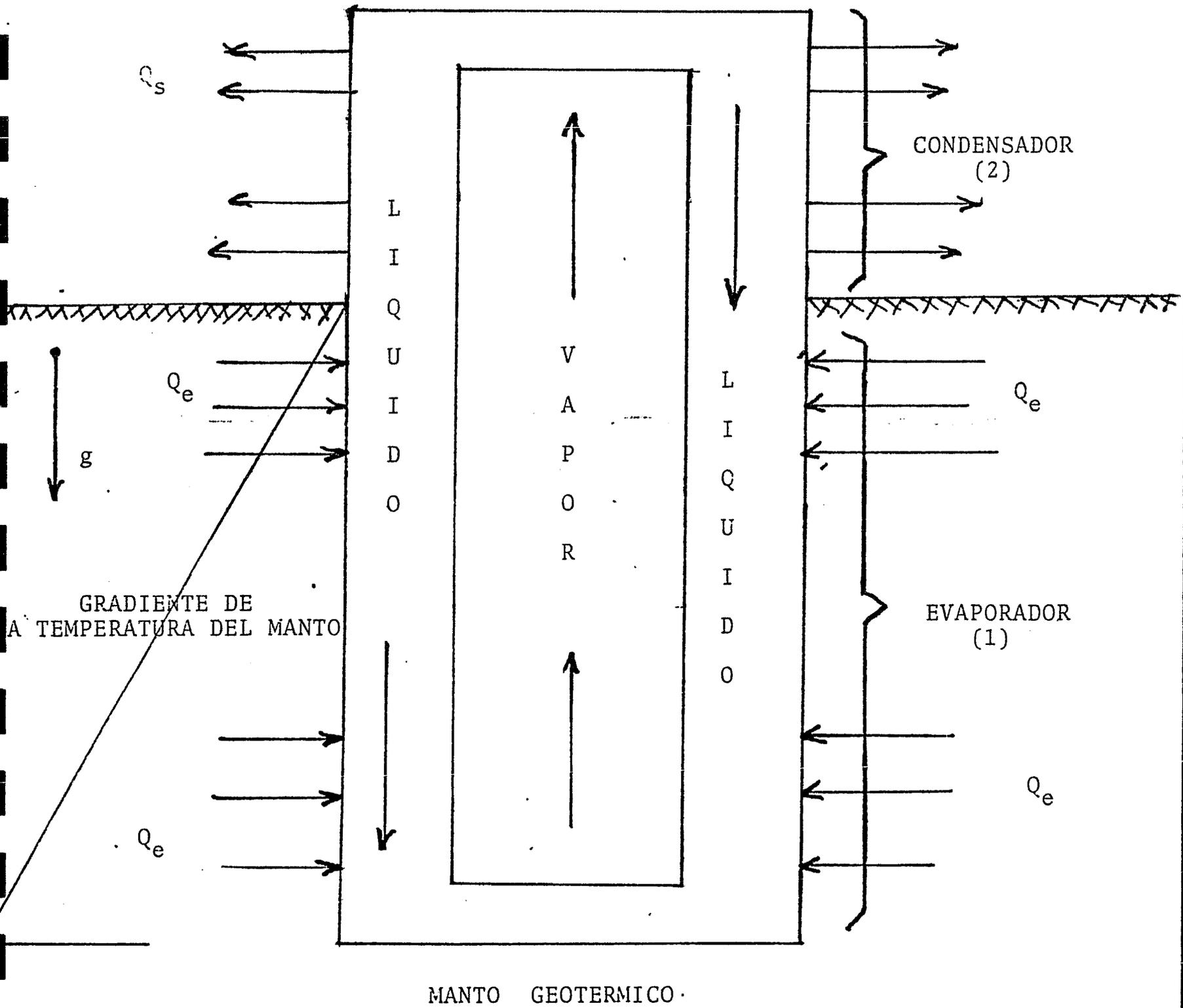


Fig (5.2)

TUBO DE CALOR CON ESTRUCTURA CAPILAR

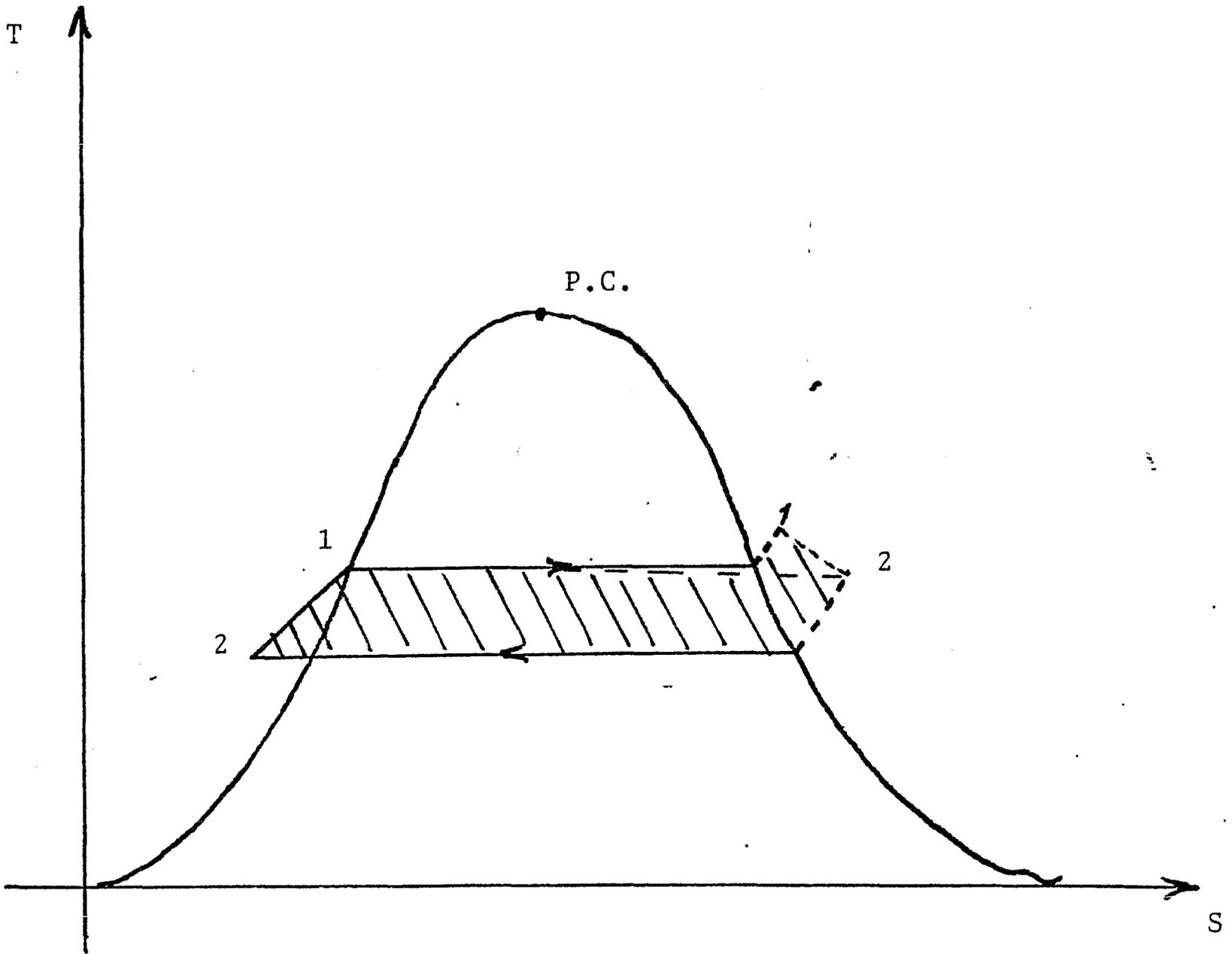


Fig. 5.5)

DIAGRAMA (T-S) PARA EL TUBO DE CALOR CON  
ESTRUCTURA CAPILAR

En el presente trabajo se plantea el uso de un sistema con semejanza al tubo de calor, pero aprovechando la acción de la gravedad para el flujo del líquido de la zona de condensación a la zona de evaporación (ver fig 5.4 y 5.5) Este sistema es un termosifón.

Una de las características del termosifón es que puede ser usado para obtener transporte de energía térmica (interna). El proceso de transporte de energía que ocurrirá en el termosifón planteado es el siguiente: el calor se trasmite del manto geotérmico hacia la región anular de líquido, el cual al ir descendiendo (por gravedad) aumenta su temperatura y presión.

La parte inferior del termosifón estará provista de un dispositivo entre la región anular del líquido y la región central del vapor, con estranguladores que servirán para que la caída de presión que se presenta en el fluido entre las dos regiones sea notable y que con esto el fluido caliente que existe en el sistema logre evaporarse en forma parcial. Ya que la presión del sistema es máxima en esta parte del circuito, deben controlarse las características de operación para que, en ese punto, las condiciones termodinámicas del líquido sean las de saturación.

El vapor que sale del termosifón se condensará (en la parte superior) de tal forma de que en ese lugar será donde se obtendrá la energía interna extraída, que es transportada -

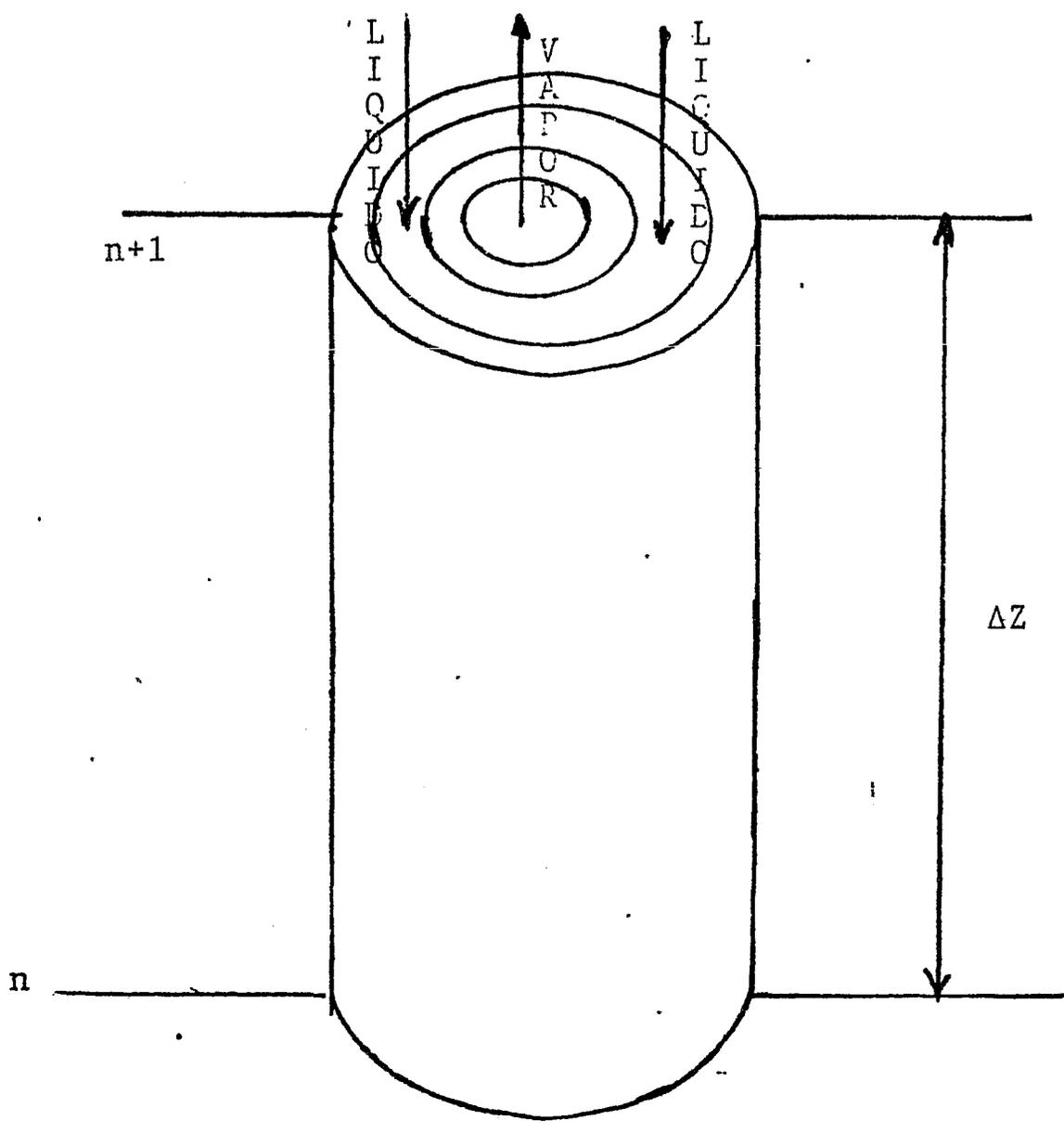
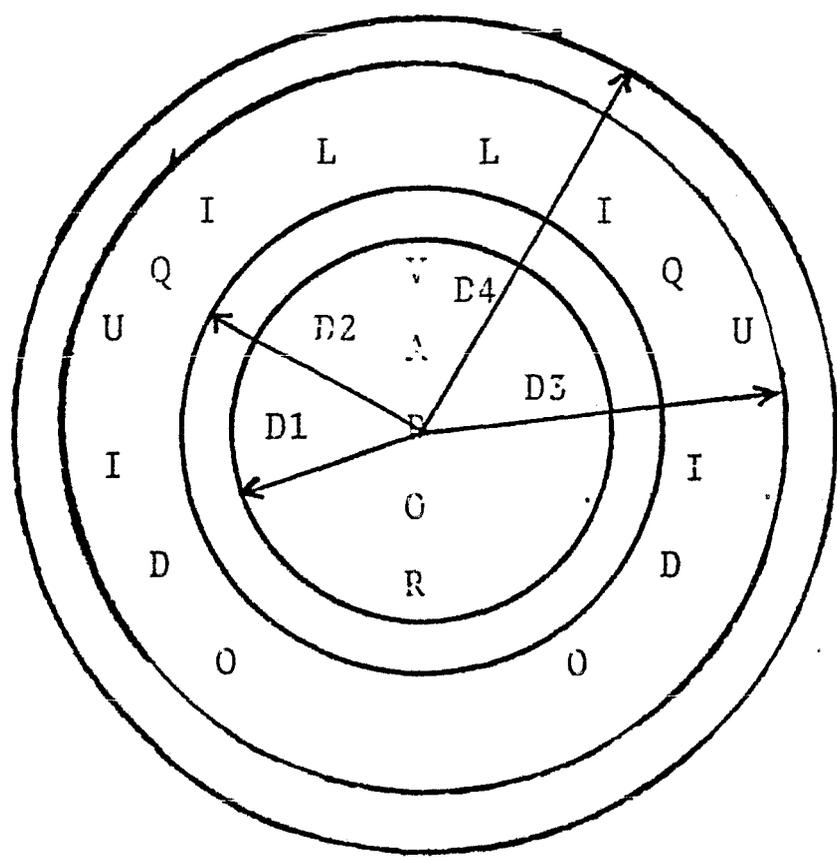


Fig (5.4) REPRESENTACION DEL TUBO DE CALOR (TERMOSIFON)

PARA EL LIQUIDO

$D3 = DI$

$D4 = DE$



PARA EL VAPOR

$D1 = AI$

$D2 = AE$

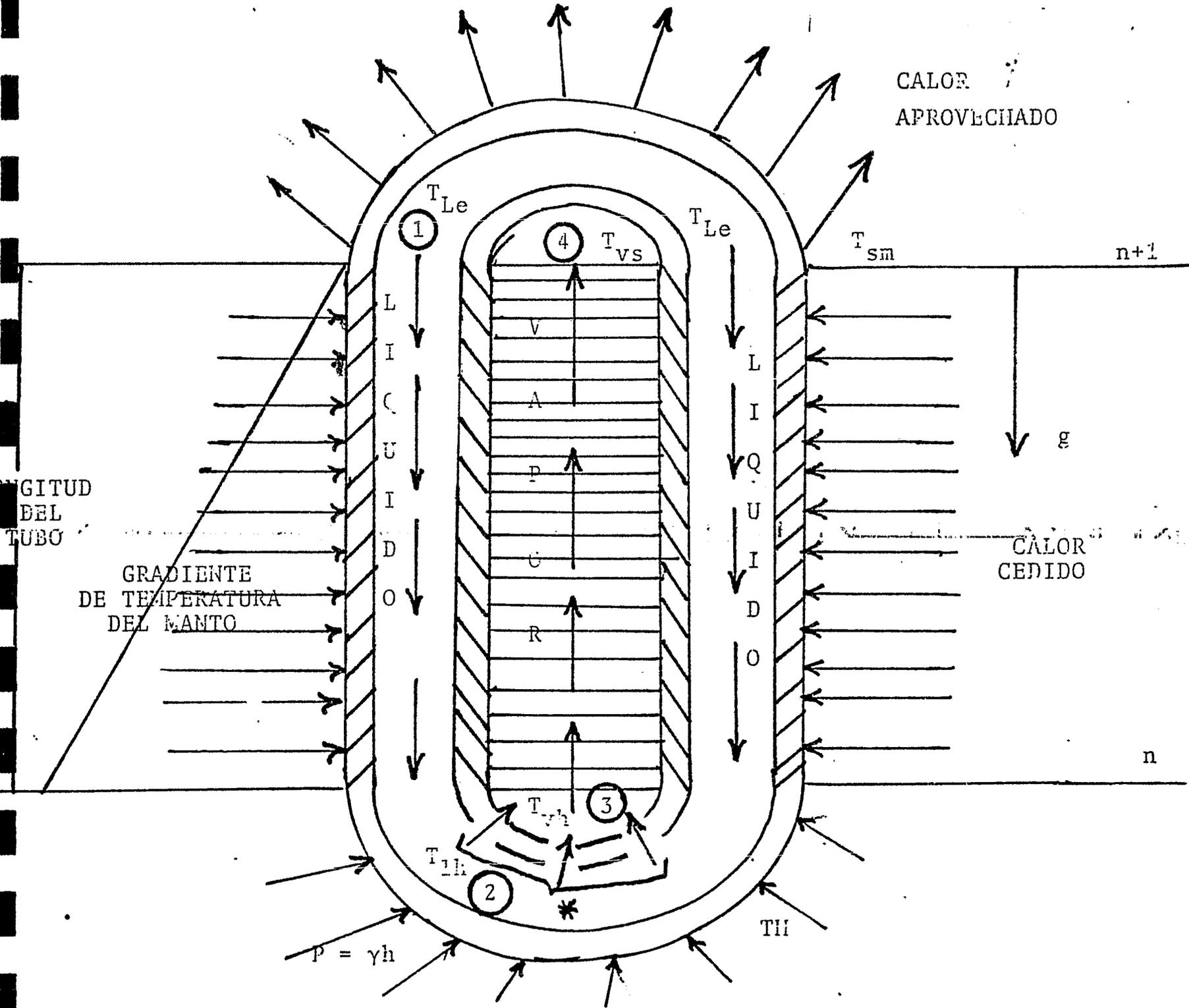
Fig (5.5) REPRESENTACION DEL TUBO DE CALOR (TERMOSIFON)

por el fluido de trabajo desde el manto geotérmico.

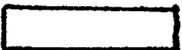
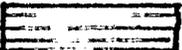
El líquido que se obtiene en el condensador retorna por efecto de gravedad hacia la parte inferior del sistema -- iniciándose un nuevo ciclo. Ver figuras (5.6 y 5.7)

El uso de la energía extraída no es objeto de este trabajo y por tal razón no se abundará en ella; únicamente se dirá que la parte superior del termosifón será una zona de en trega de energía interna.

El fluido de trabajo que se utilice en este sistema es muy importante porque de las propiedades termodinámicas de penderá el buen funcionamiento del termosifón propuesto; más adelante se presentarán las sustancias que se estudiaron y ana lizaron para ser aplicadas en el termosifón propuesto.



\* ESTRANGULADOR DEL FLUJO; ES PARA SEPARAR EN LA REGION ANULAR EN LIQUIDO Y PARA OBTENER INCREMENTO DE PRESION EN EL LIQUIDO

-  PARED DEL TUBO
-  PARED DEL TUBO
-  PARED DEL TUBO
-  PARED DEL TUBO



## PARA EL TERMOSIFON PROPUESTO:

$T_{sm}$  - Temperatura de la superficie del manto

$T_h$  - Temperatura del manto a una profundidad (H)

$T_{le}$  - Temperatura del líquido a la entrada

$T_{lh}$  - Temperatura del líquido a una profundidad (H)

$T_{vh}$  - Temperatura del vapor a una profundidad (H)

$T_{vs}$  - Temperatura del vapor, a la salida

$Q$  - Gasto de la sustancia en el sistema

$Q_e$  - Calor de entrada

$Q_s$  - Calor cedido

e - Entrada en el termosifón

s - Salida en el termosifón

H - Parte baja del termosifón a una profundidad -

para la gráfica del termosifón propuesto

$L_e-L_h$  Calentamiento del líquido y aumento de presión  
por la columna del líquido

$L_h-V_h$  Salto de presión isoentálpico (H=cte.)

$$H_{lh} = H_{vh}$$

$V_h-V_s$  Elevación del vapor, con calentamiento y en-  
friamiento del vapor

$V_s-L_e$  Extracción de la energía interna que puede ser  
por diversos procesos y que es la parte impor-  
tante del sistema

DESARROLLO MATEMATICO

En esta sección se presenta el desarrollo, a partir de las -- ecuaciones básicas de conservación, de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento térmico del sistema propuesto.

Utilizando la ecuación de Bernoulli:

i) Para el líquido:

$$\frac{V_{1e}^2}{2g} + \frac{P_{1e}}{\gamma} + \frac{H_e}{\gamma} = \frac{V_{1h}^2}{2g} + \frac{P_{1h}}{\gamma} - H_1 \quad (1)$$

eliminando y sustituyendo términos, la ecuación (1) quedará - de la siguiente forma:

$$\frac{V_{1e}^2}{2g} + \frac{P_{1e}}{\gamma} = \frac{V_{1h}^2}{2g} + \frac{P_{1h}}{\gamma} \quad (2)$$

De la ecuación de continuidad se tiene que:

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (3)$$

Considerando que  $\rho =$  constante para el caso del líquido y que sus áreas son iguales, entonces la ecuación (3) quedará:

$$V_{1e} = V_{1h} \quad (4)$$

Ahora, considerando la ecuación (4) y sustituyendo en la ecuación (2) quedará:

$$P_{1h} - P_{1e} = \gamma H \quad (5)$$

y para fines de estimación se considera que:

$$T_{1h} = T_{mh} \quad (6)$$

y también de la ecuación (5) despejando quedará lo siguiente:

$$P_{1h} = P_{1e} + \gamma H \quad (7)$$

Con estas definiciones se puede decir que si se conoce el estado termodinámico de la sustancia y que, además, si se considera un salto insoentálpico ( $h = \text{constante}$ ) hasta lograr un vapor saturado, entonces este proceso en el sistema cumplirá con las características de la gráfica del termosifón propuesto; y que el análisis que se realice en el diagrama (T-S) de cada sustancia indicará la presión de entrada ( $P_1$ ) en el líquido ( $L_e$ ), con lo cual se desarrollaría un ciclo como el mostrado en el diagrama del termosifón propuesto, y de aquí se puede obtener un análisis de factibilidad. Ver fig (5.6 y 5.7

ii) Para el vapor:

$$\frac{V_{vh}^2}{2} + \frac{P_{vh}}{\rho} + H_h + h_{vh} = \frac{V_{vs}^2}{2} + \frac{P_{vs}}{\rho} + H + h_{vs} \quad (8)$$

Despejando y desarrollando la ecuación (8) quedará:

$$h_{vs} - h_{vh} = \frac{V_{vs}^2}{2} - \frac{V_{vh}^2}{2} - \frac{P_{vs} - P_{vh}}{\rho} + H \quad (9)$$

de donde:

$$\frac{P_{vs} - P_{vh}}{\rho} = h_f \quad (10)$$

donde:

$h_f$  son las pérdidas por fricción que se presentan en el sistema

6.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y FLUJO DE FLUIDOS EN EL TUBO PROPUESTO:

El tubo propuesto es un termosifón que emplea una sola sustancia como fluido de trabajo. Sobre las propiedades de esta sustancia se hablo antes (cap 3).. La sustancia dentro del sistema mencionado será un líquido con posibilidades de evaporarse.

El fluido se considera newtoniano (esta clasificación corresponde a la respuesta de la rapidez de deformación al esfuerzo cortante en el fluido), con viscosidad dinámica ( $\mu$ ) constante y densidad ( $\rho$ ) que varía con la temperatura ( $T$ ).

El termosifón propuesto se dividirá en porciones de longitud finita ( $\Delta Z$ ) como se muestra en la figura (6.1)

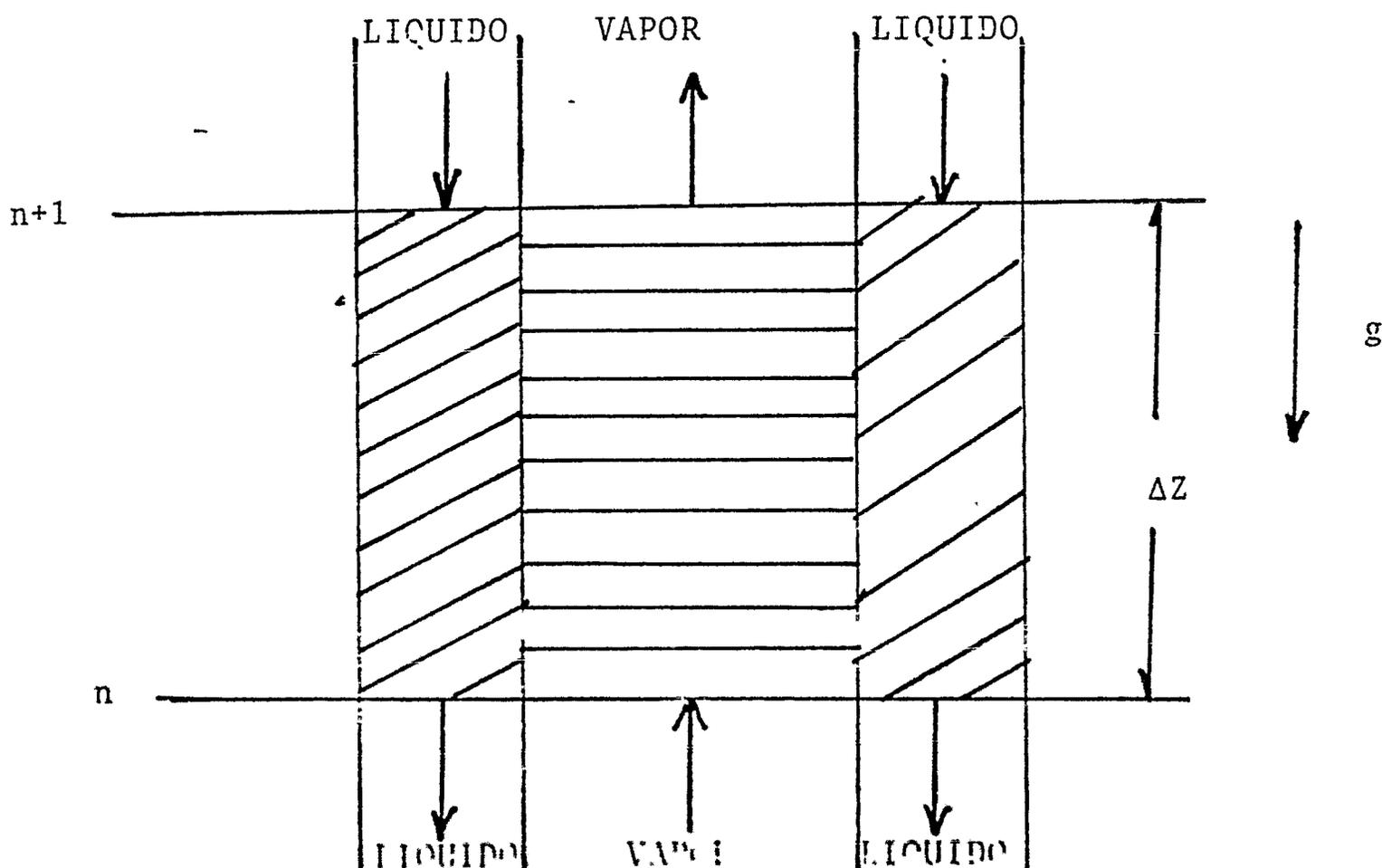


Fig (6.1)

En el termosifón propuesto se tendrán los siguientes volúmenes de control para el líquido y el vapor:

a).- Volumen de control en el líquido; se considera el que se encuentra en el espacio anular limitado por las superficies cilíndricas del tubo exterior e interior y por las tapaderas anulares imaginarias superior e inferior que tiene la porción de longitud ( $\Delta Z$ ) entre las secciones (n) y (n+1), ver figura (6.2)

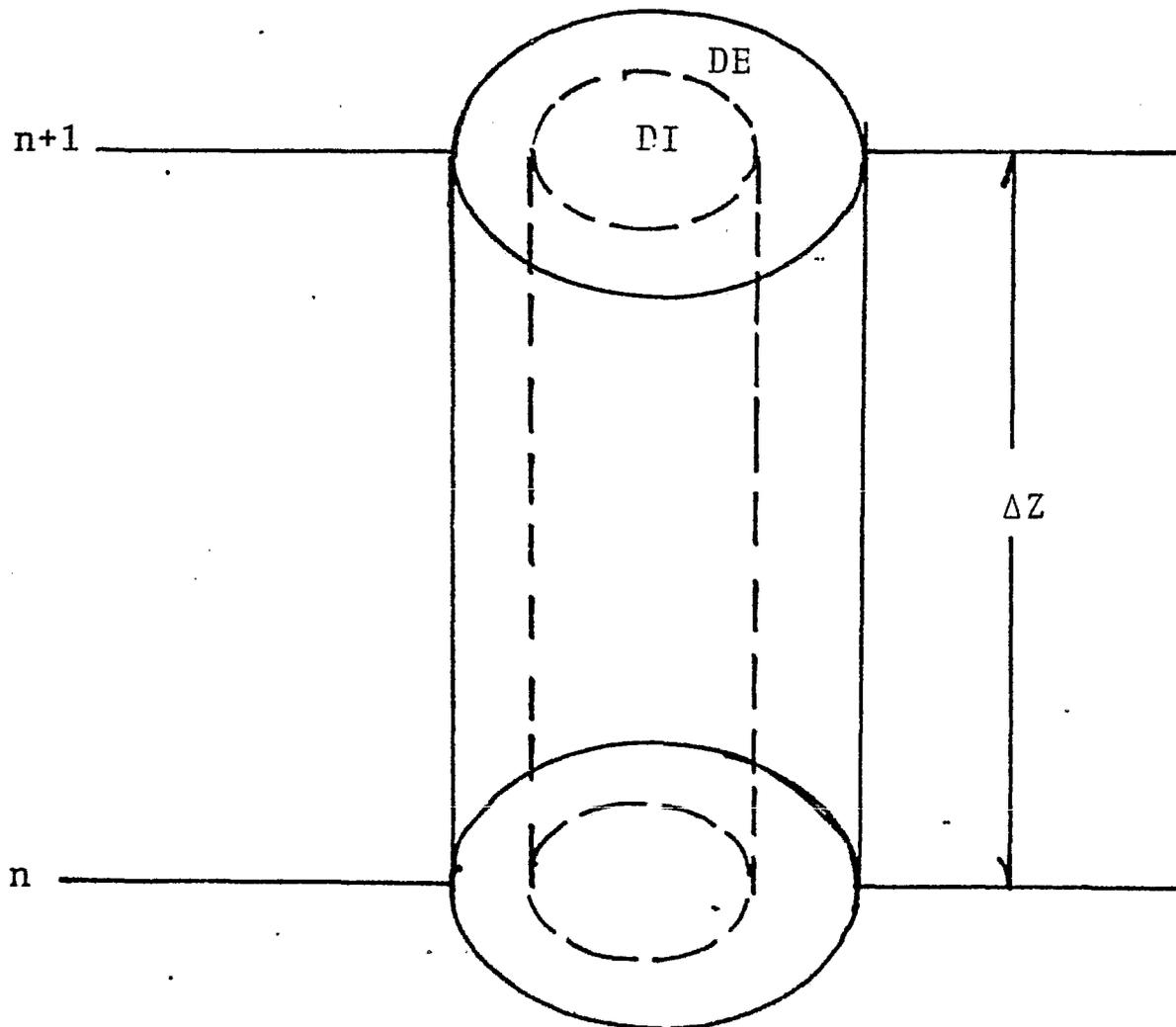


Fig (6.2)

b).- Volumen de control en el vapor; se considera - el que se encuentra limitado por el cilindro del tubo interior y por las superficies circulares imaginarias de las secciones transversales en (n) y (n+1), ver figura (6.3).

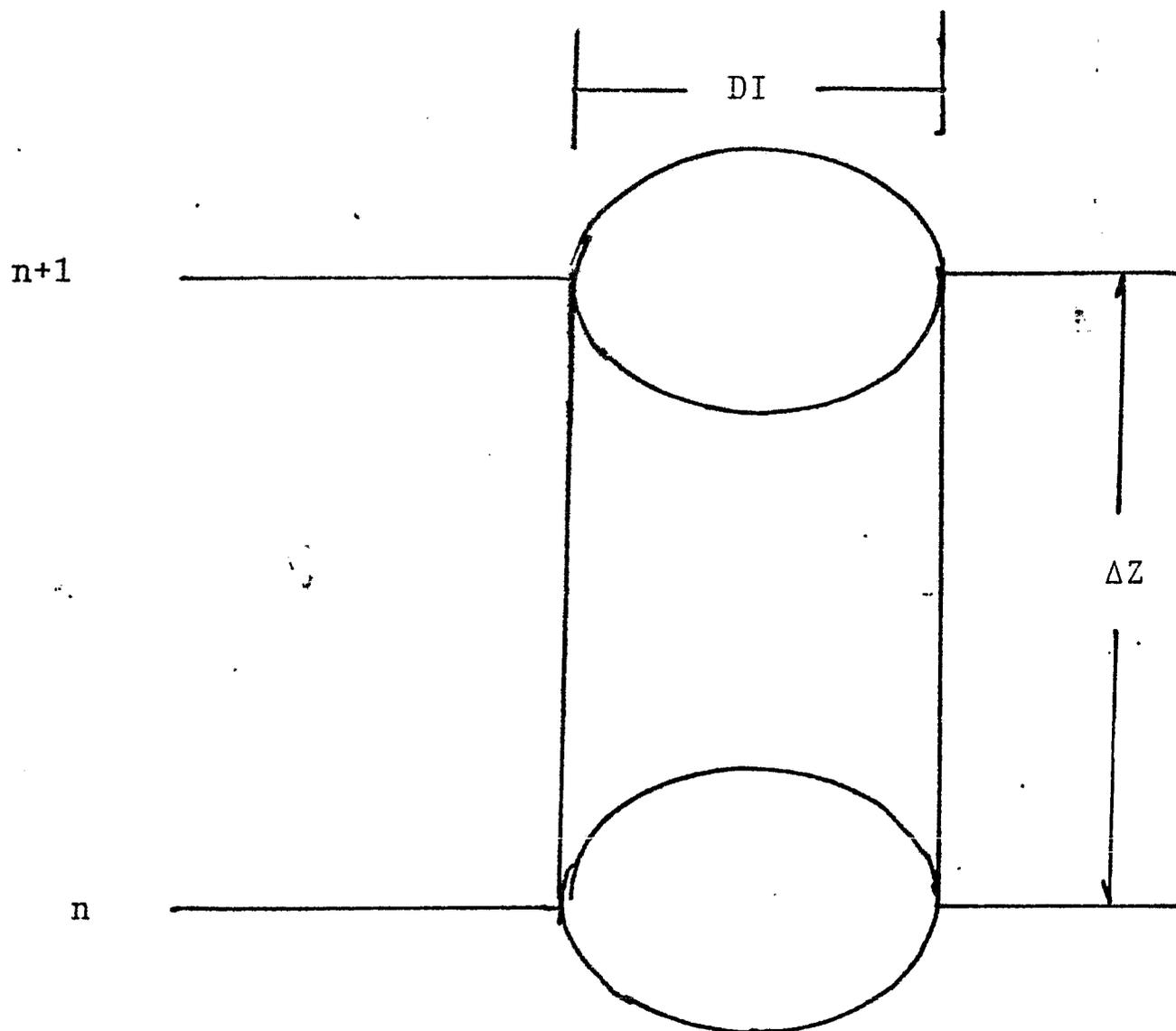


Fig (6.3)

En el termosifón propuesto la temperatura ( $T$ ), la presión ( $p$ ), la velocidad ( $V$ ) y la densidad ( $\rho$ ) se considera-

rán valores promedios que son constantes en cada sección (n), y estará variando de sección a sección debido a la transferencia de calor que se presenta desde el manto geotérmico a la columna del líquido en el termosifón, ver fig (6.4)

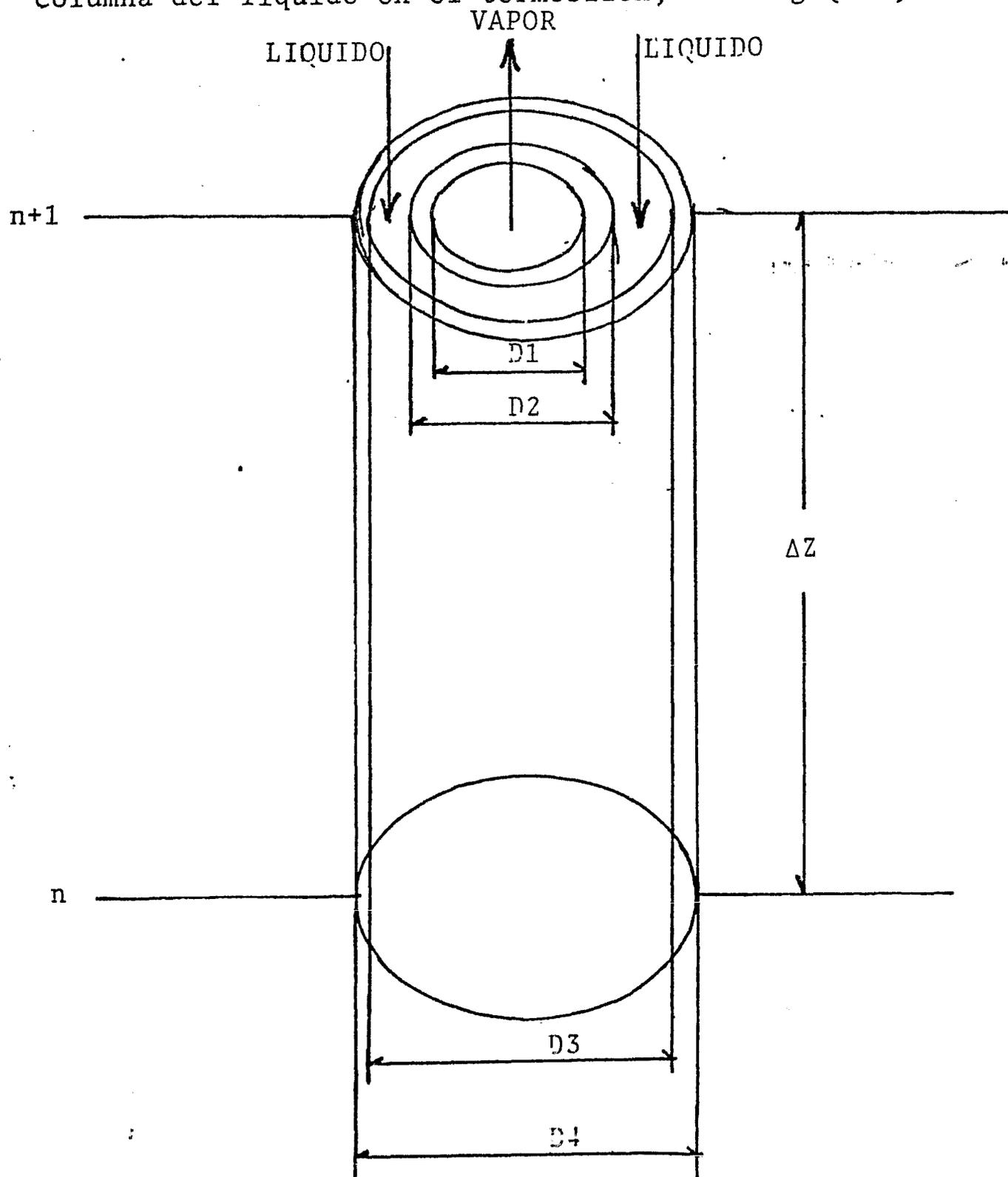


Fig (6.4)

El flujo del fluido se considerará en estado permanente ( $\delta / \delta t = 0$ ); el líquido se moverá hacia abajo por la acción de la gravedad y el vapor ascenderá debido a la diferencia de presión que es ocasionada a través del extremo inferior del termosifón; y en la parte superior es donde se condensa el vapor.

En este sistema, las ecuaciones que gobiernan el flujo del fluido se plantean a partir de un análisis integral, aplicando los principios de conservación de masa, cantidad de movimiento y de energía en un elemento ( $\Delta Z$ ) del termosifón; estas ecuaciones y las ecuaciones de estado o tablas de propiedades de la sustancia forman un sistema cerrado que es susceptible de solución.

A).- Aplicando el principio de conservación de masa o continuidad, se tiene que:

i). Para el líquido:

$$\rho_{1n} V_{1n} A_1 = \rho_{1n+1} V_{1n+1} A_1 \quad (1)$$

Donde:

1 - Es un subíndice que significa líquido

$A_1$  - Es el area anular de paso para el líquido

ii). Para el vapor:

$$\rho_{vn} V_{vn} A_v = \rho_{vn+1} V_{vn+1} A_v \quad (2)$$

Donde:

$$\rho_{vn+1} = \frac{1}{V_{vn+1}}$$

(2a)

v - Es un subíndice que significa vapor

$A_v$  - Es el area de paso para el vapor

B). Aplicando el principio de la conservación de la cantidad de movimiento; ver fig (6.5) (2° ley de Newton:  $(\sum F = \dot{m} \Delta v)$ )

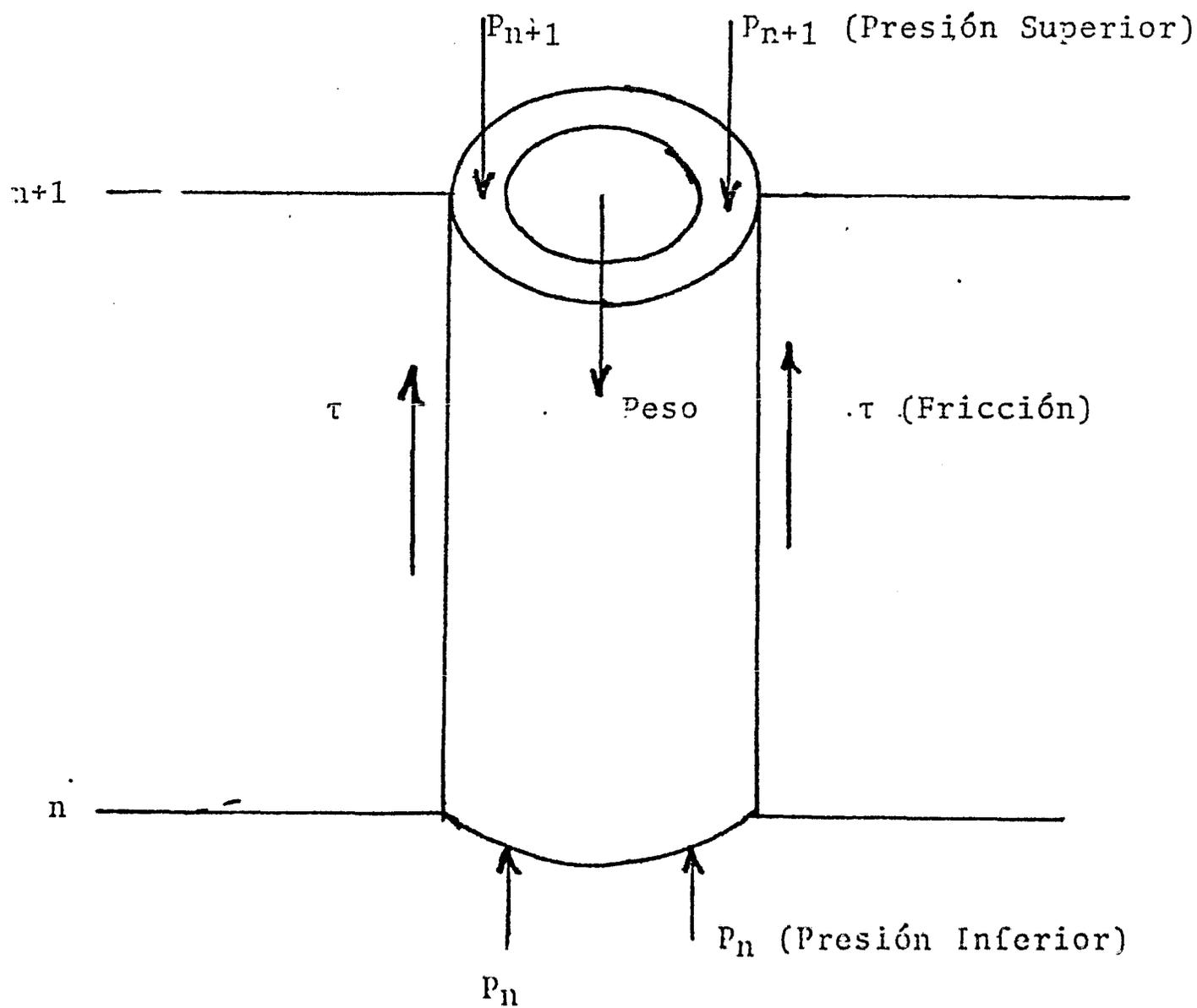


Fig (6.5)

i) Para el líquido:

$$A_1 \Delta Z \frac{\rho_{1n} + \rho_{1n+1}}{2} g + (P_{1n+1} - P_{1n}) A_1 - f \frac{\Delta Z}{DH} \cdot \frac{\rho_{1n} + \rho_{1n+1}}{2}$$

$$\frac{V_{1n}^2 + V_{1n+1}^2}{2} A_1 = \rho_{1n} V_{1n} A_1 (V_{1n} - V_{1n+1}) \quad (3)$$

Donde:

$\Delta Z$  - Es la longitud del tubo (termosifón propuesto)

$f$  - Es el coeficiente de rozamiento o de fricción del sistema

$DH$  - Diámetro hidráulico de la sección anular

$g$  - Constante de gravedad

ii) Para el vapor; ver figura (6.6)

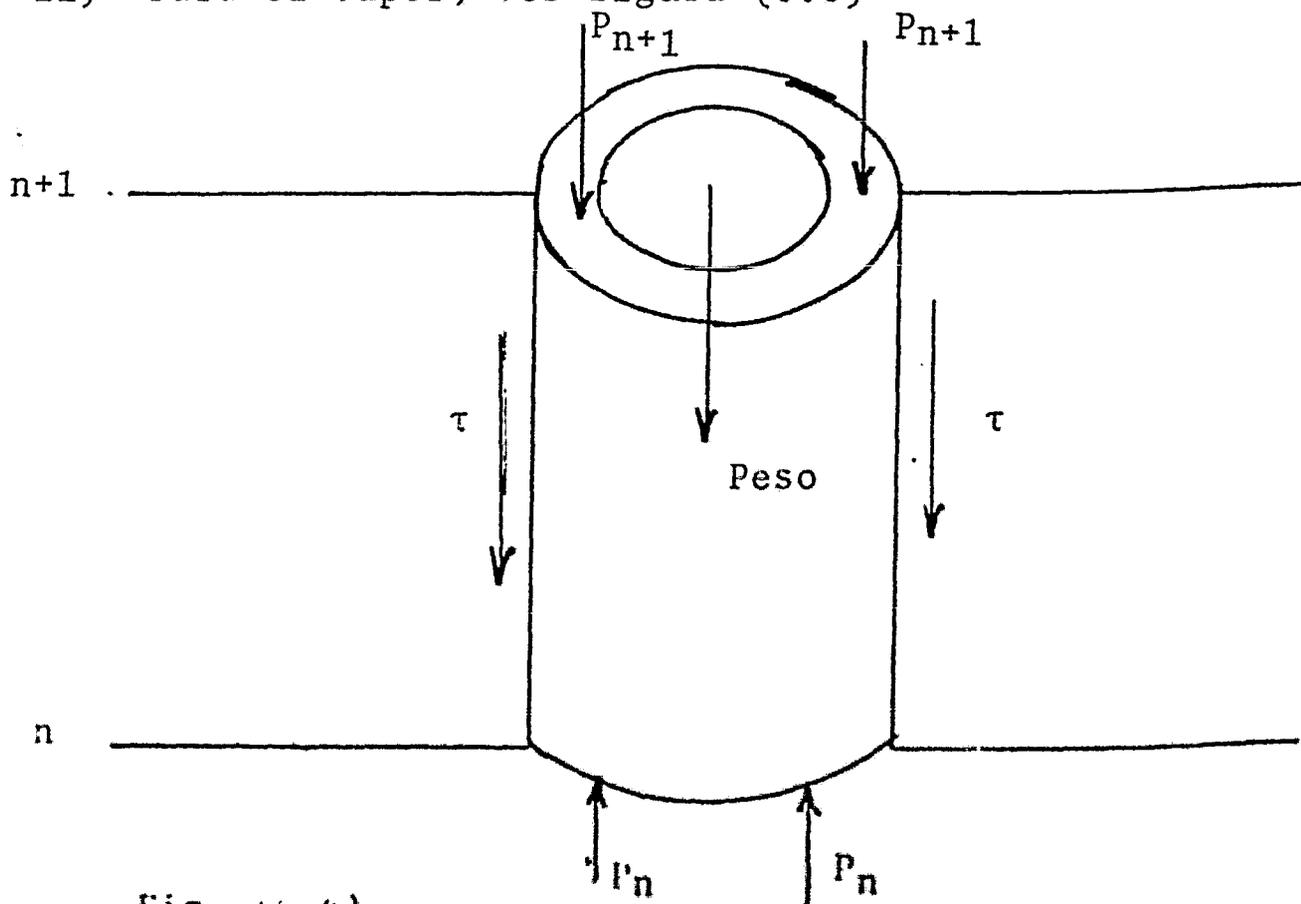


Fig (6.6)

$$(P_{vn} - P_{vn+1}) A_{vn} - A_{vn} \cdot \Delta Z \cdot \frac{\rho_{vn} + \rho_{vn+1}}{2} \cdot g - f \frac{\Delta Z}{DH} \cdot \frac{\rho_{vn} + \rho_{vn+1}}{2} \cdot$$

$$\frac{V_{vn}^2 + V_{vn+1}^2}{2} A_{vn} = \rho_{vn} A_{vn} V_{vn} (V_{vn+1} - V_{vn}) \quad (4)$$

Las ecuaciones (3) y (4) se resolverán para encontrar las presiones respectivas para el líquido y vapor en el sistema; para la ecuación (3) se tendrá:

$$A_1 \Delta Z \frac{\rho_{1n} + \rho_{1n+1}}{2} g + (P_{1n+1} - P_{1n}) A_1 - f \frac{\Delta Z}{DH} \frac{\rho_{1n} + \rho_{1n+1}}{2}$$

$$\frac{V_{1n}^2 + V_{1n+1}^2}{2} A_1 = \rho_{1n} V_{1n} A_1 (V_{1n} - V_{1n+1}) \quad (4a)$$

de la ecuación (4a) se despejará  $(P_{1n+1})$  para el líquido que se encuentra en el sistema:

$$P_{1n+1} = P_{1n} + f \frac{\Delta Z}{DH} \frac{\rho_{1n} + \rho_{1n+1}}{2} \frac{V_{1n}^2 + V_{1n+1}^2}{2} + \rho_{1n} V_{1n} (V_{1n} - V_{1n+1}) - \Delta Z \frac{\rho_{1n} + \rho_{1n+1}}{2} g \quad (4b)$$

\* NOTA: Las ecuaciones explícitas encerradas en recuadro son usadas en el procedimiento numérico de solución que se presenta más adelante, que es basado en el diagrama de flujo.

La ecuación (4b) es la ecuación deseada para encontrar la presión del líquido que se desarrolla a todo lo largo del tubo propuesto.

De la ecuación (4) se despeja ( $P_{vn+1}$ ) para el vapor que se encuentra en el sistema:

$$P_{vn+1} = P_{vn} - f \frac{\Delta Z}{DH} \frac{\rho_{vn} + \rho_{vn+1}}{2} \frac{V_{vn}^2 + V_{vn+1}^2}{2} - \rho_{vn} V_{vn} (V_{vn} - V_{vn+1}) - \Delta Z \frac{\rho_{vn} + \rho_{vn+1}}{2} g$$

(4c)

La ecuación (4c) es la ecuación deseada para encontrar la presión del vapor que se desarrolla a todo lo largo del tubo propuesto.

c).- Aplicando el principio de la conservación de la energía  
Ver figuras (6.7 y 6.7a)

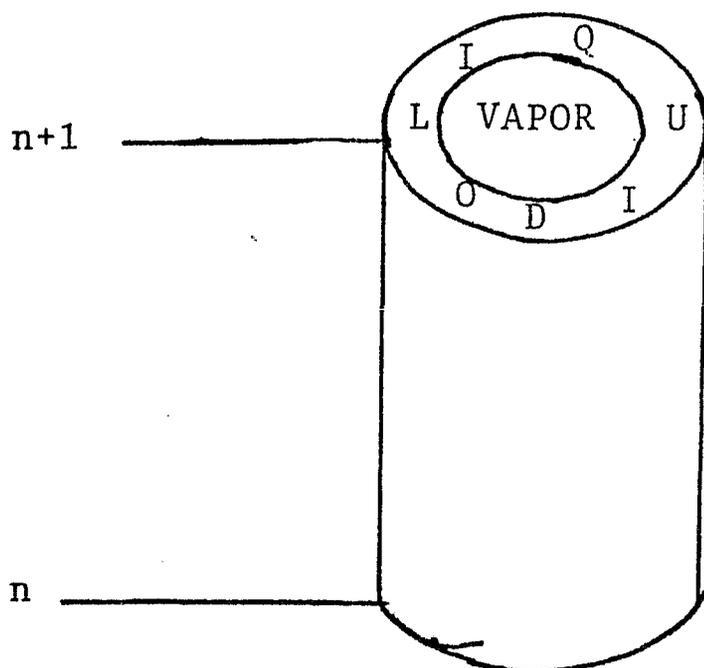


Fig (6.7)

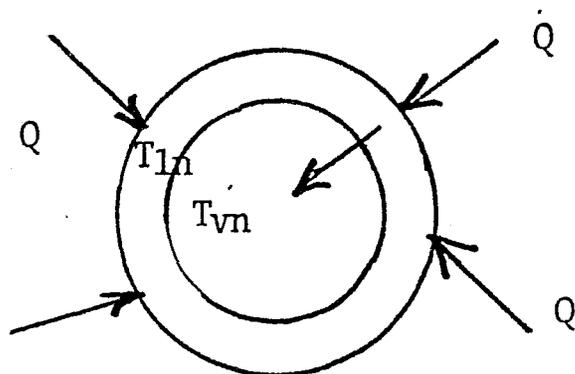
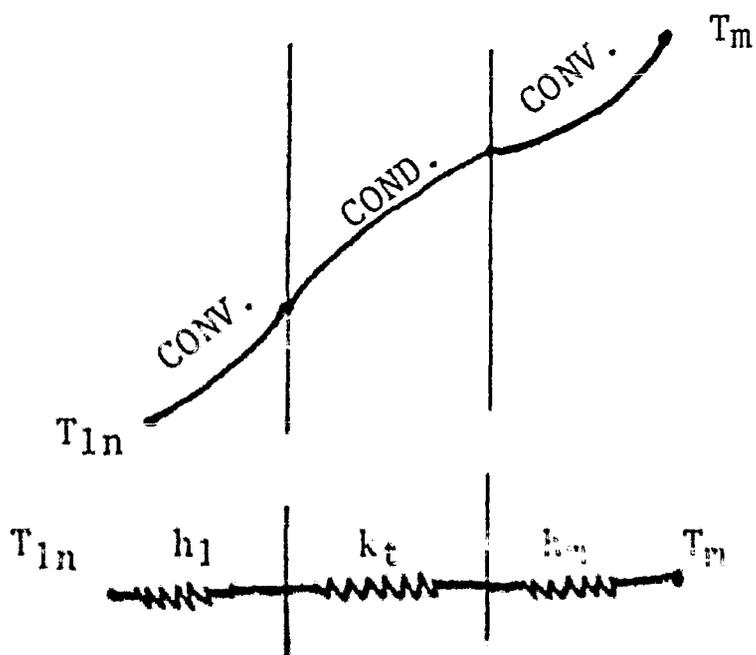


Fig (6.7a)

(5)

SI:  $Q = AUAT$   
 1er. CASO (LIQUIDO-MANTO)



Donde:

m - Es un subíndice que significa manto

t - Es un subíndice que significa tubo

Q - Coeficiente total de transferencia de calor

h - Coeficiente de transferencia de calor por con  
vección

K - Coeficiente de conductividad térmica por conduc  
ción del material.

Del primer caso se tendrá lo siguiente: considerando que el sistema de tratará por medio de resistencia donde se -- presentará en el sistema conducción y convección, y que además el sistema se encuentra en el medio líquido - manto, se tendrá lo siguiente:

$$R_{hm} = \frac{1}{h_m \Delta Z D^4 \pi} \quad (6)$$

$$R_{kt} = \frac{1_n D^4/D^3}{2\pi \Delta Z K_t} \quad (7)$$

$$R_{h1} = \frac{1}{h_1 \Delta Z D^3 \pi} \quad (8)$$

Si se sabe que para obtener la resistencia total en se  
rie de un sistema su forma es:

$$R_T = \sum_{i=1}^n R_i \quad (9)$$

y se sabe que la transferencia total de calor para el medio líquido-manto.

es la siguiente:

$$Q_{m-1} = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (10)$$

sustituyendo las ecuaciones 6, 7 y 8 en 9 se tendrá la resistencia total para el sistema:

$$R_T = \frac{1}{\pi h_m \Delta Z D_4} + \frac{1_n D_4/D_3}{2\pi K_t \Delta Z} + \frac{1}{\pi h_1 \Delta Z D_3} \quad (11)$$

sustituyendo la ecuación 11 en 10 se tendrá la transferencia de calor total para el sistema líquido-manto en el tubo propuesto.

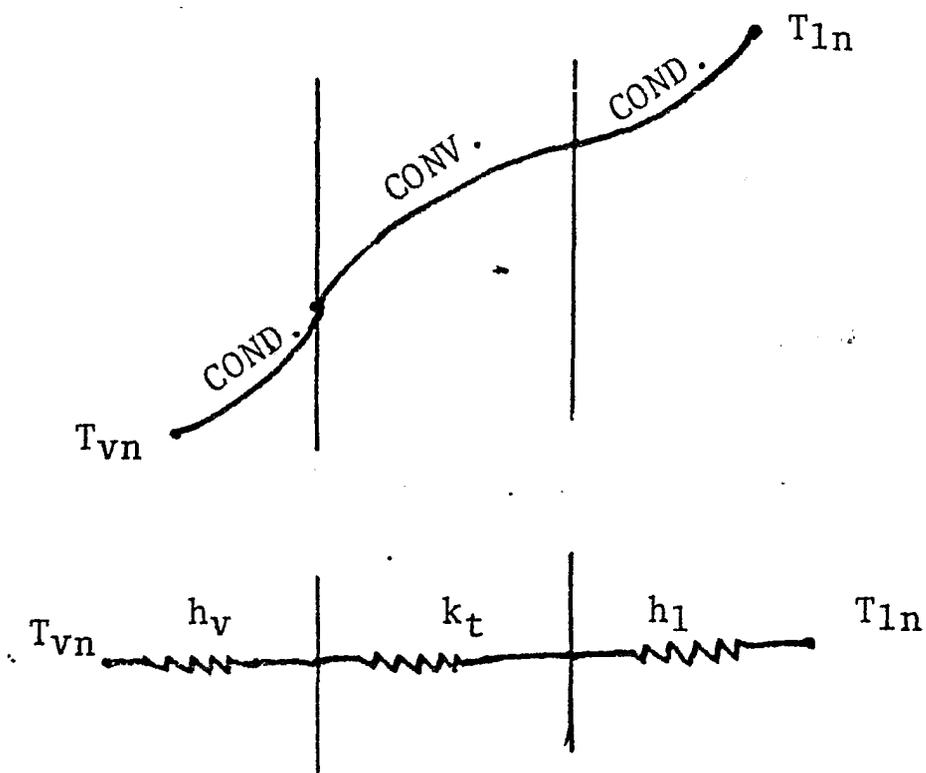
$$\frac{\Delta T}{Q_{m-1}} = \frac{1}{\pi \Delta Z} \left[ \frac{1}{h_m D_4} + \frac{1_n D_4/D_3}{2K_t} + \frac{1}{h_1 D_3} \right] \quad (12)$$

despejando de la ecuación 12 la transferencia de calor total ( $Q_{m-1}$ ):

$$Q_{m-1} = \frac{\pi \Delta Z (T_m - T_{1n})}{\frac{1}{h_m D_4} + \frac{1_n D_4/D_3}{2K_t} + \frac{1}{h_1 D_3}} \quad (13)$$

La ecuación 13 , es la ecuación deseada para encontrar la -  
transferencia de calor total que se presenta en un sistema de  
líquido-manto.

SEGUNDO CASO (VAPOR-LIQUIDO)



Del segundo caso, considerando que el sistema se trabajara con  
resistencias y que además es un sistema con medio vapor-líquido  
se tendrá que:

$$R_{h1} = \frac{1}{\pi_{h1} \Delta Z D^2} \quad (14)$$

$$R_{kt} = \frac{1_n D^2/D1}{2\pi K_t \Delta Z} \quad (15)$$

$$R_{hv} = \frac{1}{\pi_{hv} \Delta Z D1} \quad (16)$$

la representación de la resistencia total en serie es:

$$R_T = \sum_{i=1}^n R_i \quad (17)$$

y la transferencia total del sistema vapor-líquido es:

$$Q_{v-1} = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (18)$$

sustituyendo las ecuaciones 14 , 15 y 16 en 17 se tendrá la resistencia total del sistema:

$$R_T = \frac{1}{\pi_{h1} \Delta Z D2} + \frac{1_n D2/D1}{2\pi K_t \Delta Z} + \frac{1}{\pi_{hv} \Delta Z D1} \quad (19)$$

sustituyendo la ecuación 19 en 18 quedará:

$$\frac{\Delta T}{Q_{v-1}} = \frac{1}{\pi \Delta Z} \left( \frac{1}{h_1 D2} + \frac{1_n D2/D1}{2K_t} + \frac{1}{h_v D1} \right) \quad (20)$$

despejando de la ecuación 20 la transferencia de calor total para el sistema ( $Q_{v-1}$ ) se tendrá:

$$Q_{v-1} = \frac{\pi \Delta Z (T_{vn} - T_{1n})}{\frac{1}{h_1 D_2} + \frac{1}{2K_t} \frac{D_2/D_1}{D_1} + \frac{1}{h_v D_1}}$$

(21)

la ecuación 21 es la ecuación deseada para encontrar la transferencia total de calor que se presenta en la parte de vapor-líquido del sistema.

Considerando lo anterior y sabiendo que se está trabajando en el caso del principio de la conservación de la energía se tendrá, ver fig (6.8)

i) Para el líquido:

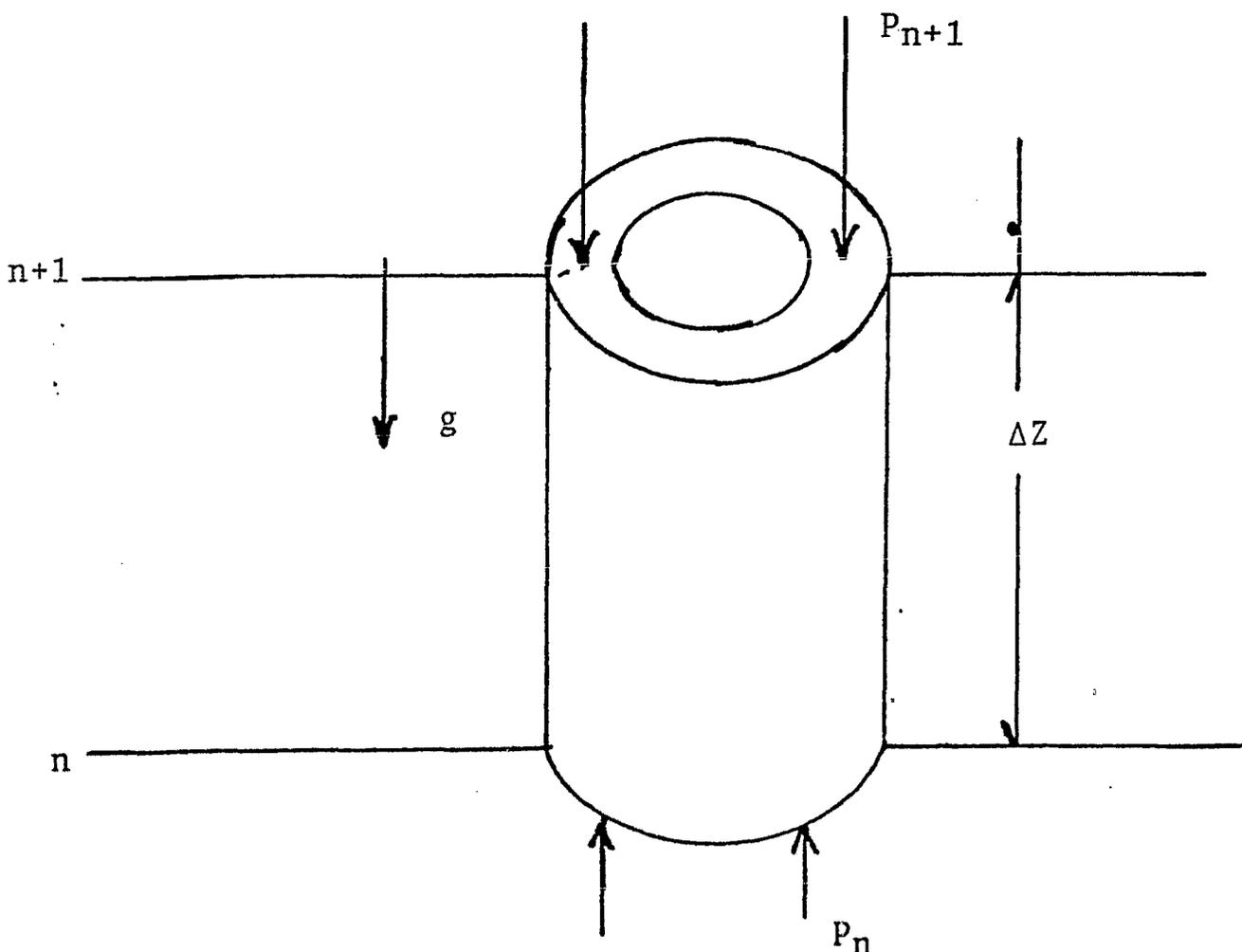


Fig (6.8)

Se sabe que en el sistema se tiene un recorrido con respecto al tubo que es:

$$\Delta t = \frac{\Delta Z}{V_n} \quad (22)$$

y que además la energía total del sistema es:

$$\Delta E = Q - W \quad (23)$$

sustituyendo en la ecuación 23 sus diferentes formas quedará:

$$Q - W = E.U. + E.P. + E.C. \quad (24)$$

Se sabe que:

$$E.U. = \rho_1 A_1 \Delta Z C_p (T_{1n} - T_{1n+1}) \quad (25)$$

$$E.P. = \rho_1 A_1 \Delta Z g \Delta Z \quad (26)$$

$$E.C. = \frac{1}{2} \rho_1 A_1 \Delta Z (V_{1n}^2 - V_{1n+1}^2) \quad (27)$$

$$Q = (Q_{m-1} - Q_{v-1}) \frac{\Delta Z A_1}{V_{1n}} \quad (28)$$

$$W = A_1 \Delta Z P_{1n+1} - A_1 \Delta Z P_{1n} \quad (29)$$

sustituyendo las ecuaciones (25), (26), (27), (28) y (29) en (24) quedará:

$$\begin{aligned} & (Q_{m-1} - Q_{v-1}) \frac{\Delta Z A_1}{V_{1n}} - A_1 \Delta Z P_{1n+1} + A_1 \Delta Z P_{1n} = \\ & = \rho_1 A_1 \Delta Z C_p (T_{1n} - T_{1n+1}) + \rho_1 A_1 \Delta Z g \Delta Z + \frac{1}{2} \rho_1 A_1 \Delta Z (V_{1n}^2 - V_{1n+1}^2) \end{aligned} \quad (30)$$

Despejando de la ecuación 30 la temperatura ( $T_{1n+1}$ ) del líquido, se tiene para el sistema:

$$\begin{aligned} T_{1n+1} = & T_{1n} + \frac{g \Delta Z}{C_p} + \frac{1}{2 C_p} (V_{1n}^2 - V_{1n+1}^2) - \frac{1}{\rho_1 V_{1n} C_p} (Q_{m-1} - Q_{v-1}) \\ & + \frac{1}{\rho_1 C_p} P_{1n+1} - \frac{1}{\rho_1 C_p} P_{1n} \end{aligned} \quad (30a)$$

la ecuación (30a) es la ecuación deseada para encontrar la temperatura del líquido que se encuentra en el sistema propuesto.

ii) Para el vapor: Ver figura (6.9)

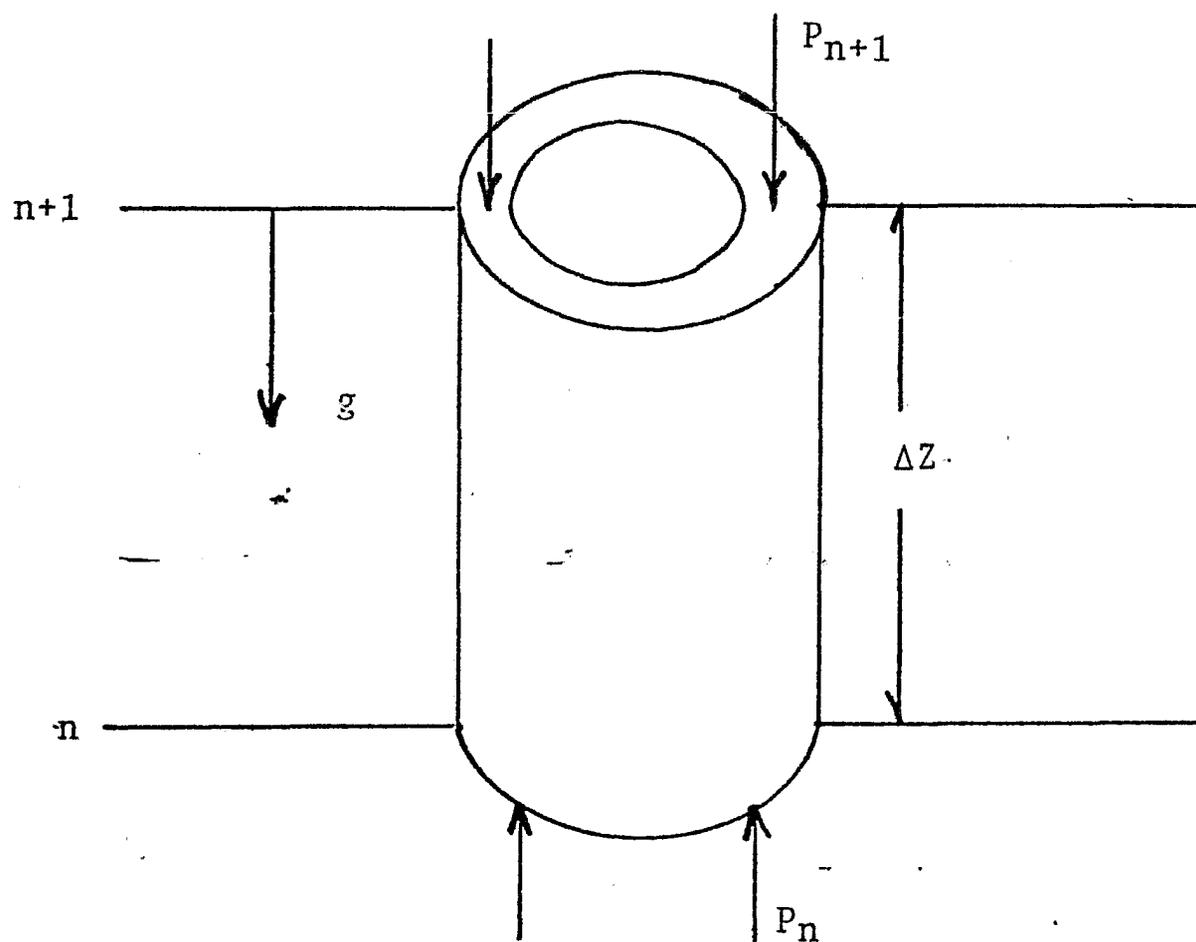


Fig (6.9)

Utilizando el mismo procedimiento que se usó para el líquido, la única diferencia que se tendrá aquí es con respecto al flujo de calor donde en vez de que se tenga - - - -

$(Q_{m-1} - Q_{v-1}) \frac{A_v}{V_{vn}}$  se tendrá;  $(Q_{v1} \frac{Z}{V_{vn}})$  y volviendo a retomar -

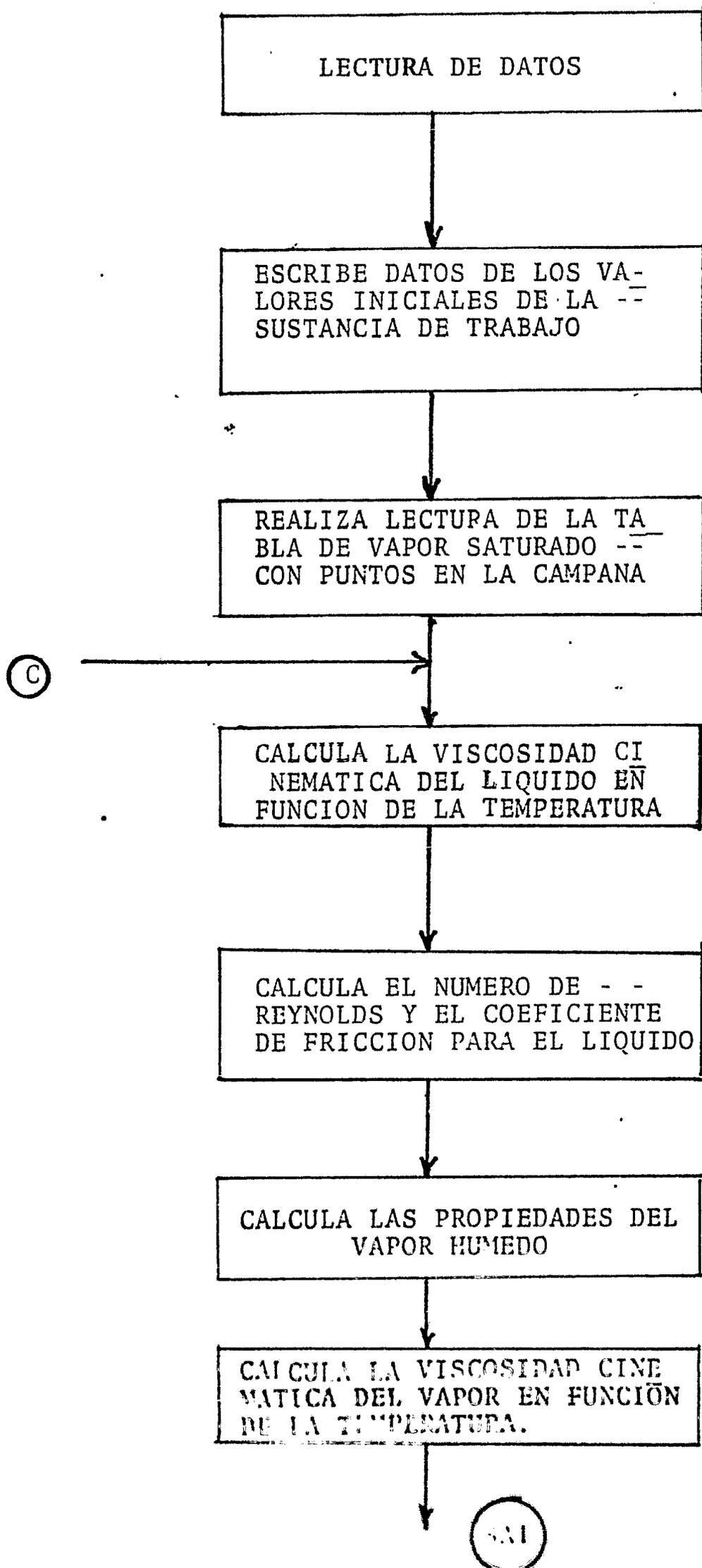
la ecuación (30) se tendrá:

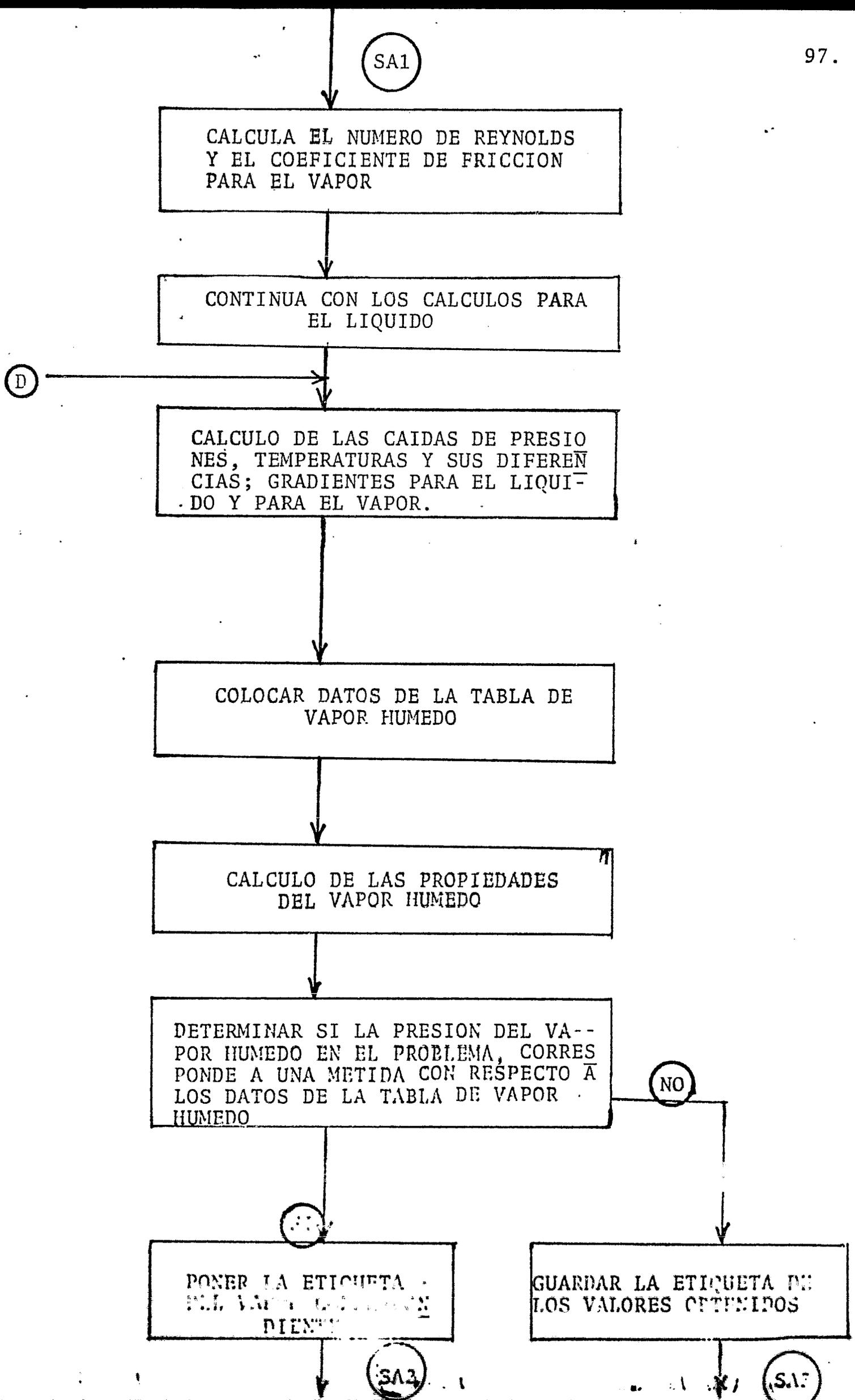
$$\begin{aligned}
 & A_v \Delta Z P_{vn} - A_v \Delta Z P_{vn+1} + (Q_{v-1}) \frac{\Delta Z}{V_{vn}} A_v = \\
 & = \rho_v A_v \Delta Z C_p (T_{vn+1} - T_{vn}) - \rho_v A_v \Delta Z g \Delta Z + \frac{1}{2} \rho_v A_v \Delta Z (V_{vn+1}^2 - V_{vn}^2) \quad (31)
 \end{aligned}$$

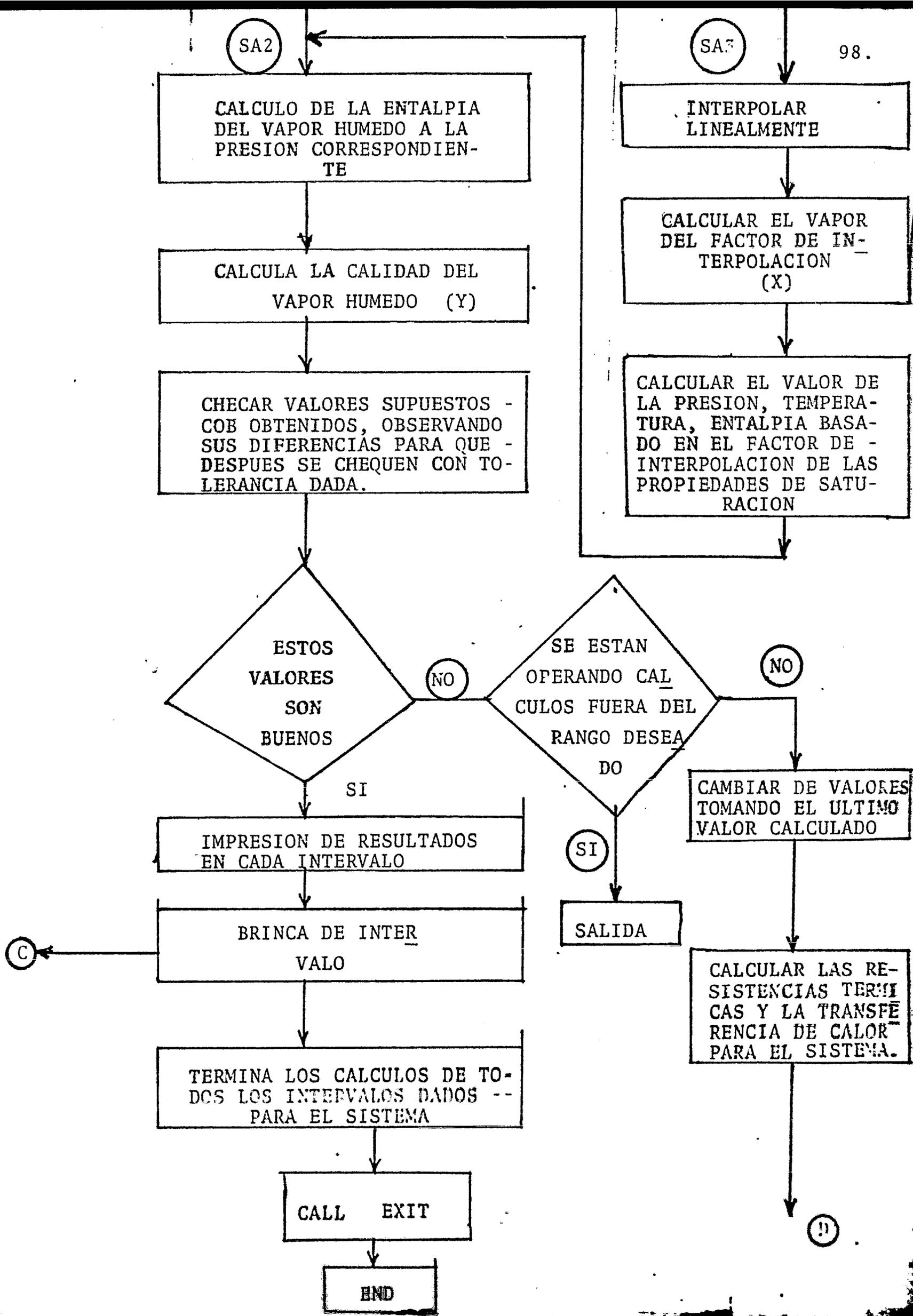
Despejando de la ecuación 31 la temperatura ( $T_{vn+1}$ ) del vapor, se tiene para el sistema:

$$\begin{aligned}
 T_{vn+1} = T_{vn} + \frac{g \Delta Z}{C_p} - \frac{1}{2 C_p} (V_{vn+1}^2 - V_{vn}^2) + \frac{1}{\rho_v V_{vn} C_p} (Q_{v-1}) \\
 - \frac{1}{\rho_v C_p} P_{vn+1} + \frac{1}{\rho_v C_p} P_{vn} \quad (32)
 \end{aligned}$$

la ecuación (32) es la ecuación deseada para encontrar la temperatura del vapor que se encuentra en el sistema propuesto.

7.- DIAGRAMA DE FLUJO:





SA2

SA3

98.

CALCULO DE LA ENTALPIA DEL VAPOR HUMEDO A LA PRESION CORRESPONDIENTE

CALCULA LA CALIDAD DEL VAPOR HUMEDO (Y)

CHECAR VALORES SUPUESTOS - COB OBTENIDOS, OBSERVANDO SUS DIFERENCIAS PARA QUE DESPUES SE CHEQUEN CON TOLERANCIA DADA.

ESTOS VALORES SON BUENOS

NO

SE ESTAN OPERANDO CALCULOS FUERA DEL RANGO DESEADO

NO

SI

SI

CAMBIAR DE VALORES TOMANDO EL ULTIMO VALOR CALCULADO

SALIDA

CALCULAR LAS RESISTENCIAS TERMICAS Y LA TRANSFERENCIA DE CALOR PARA EL SISTEMA.

!

C

IMPRESION DE RESULTADOS EN CADA INTERVALO

BRINCA DE INTERVALO

TERMINA LOS CALCULOS DE TODOS LOS INTERVALOS DADOS PARA EL SISTEMA

CALL EXIT

END

Se está generalizando el diagrama de flujo que se presenta en este trabajo con el fin de que sea útil para el desarrollo de cualquier cálculo que se desee efectuar a un tubo de calor o termosifón que sea aplicado para el aprovechamiento de la energía geotérmica, pero también se tiene que analizar las características o propiedades que tiene el manto geotérmico y la sustancia de trabajo a utilizar.

## 8.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los estudios realizados previos a la elaboración de esta tesis y de los capítulos precedentes, se pueden desprender las siguientes conclusiones:

1. La importancia que tienen los yacimientos geotérmicos reside en el aprovechamiento del calor que puede ser extraído del subsuelo. Nuestro país tiene grandes áreas que pueden ser aprovechadas en su totalidad, lo que representa una riqueza que para el futuro será ampliamente desarrollada, aunque hasta la fecha no se han estudiado muy bien las características de los yacimientos. Se lleva un poco de avance sobre ellos por la exploración y explotación que están realizando la Comisión Federal de Electricidad en unión con el Instituto de Investigaciones Eléctricas y se espera que con estos estudios se realice una evolución en congruencia con las realidades y necesidades del país.

2. Se ha destacado la enorme utilidad de los tubos de calor para transportar energía térmica eficientemente. Se plantea la conveniencia de usar los tubos de calor en procesos de aprovechamiento térmico. Los tubos de calor son dispositivos que, en comparación con otros, no son costosos, y son fáciles de construir y manejar.

3. El tubo de calor o termosifón propuesto cumple con las características del tubo convencional, pero la dife-

rencia que se tiene en este es que en toda la sección del sistema se puede aprovechar la energía, puede ser aplicado al -- aprovechamiento de la energía geotérmica. Además, se le puede introducir una sustancia de trabajo orientada al mejor aprovechamiento de la energía geotérmica. Otra de las diferencias es que la posición no será como el convencional, sino que su posición sera en forma vertical para un mejor aprovechamiento de la energía. También se tendrá una zona de estrangulamiento con el fin de que se presente una diferencia de presiones para que la energía que se encuentre dentro del sistema sea mejor aprovechada; es por eso que se dice que tiene una buena factibilidad de aprovechamiento para ser aplicado en yacimientos geotérmicos.

Con base en estas conclusiones se recomienda, como etapa posterior a la que aquí termina, realizar un estudio de factibilidad del tubo de calor o termosifón para la extracción del calor de yacimientos geotérmicos, analizando las características del tubo de calor y de la sustancia de trabajo.

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- FUNDAMENTOS DE AIRE ACONDICIONADO Y REFRIGERACION  
Autor: Ing. Eduardo Hernández Goribar  
Edit.: Limusa, México, 1975
- 2.- AIRE ACONDICIONADO Y REFRIGERACION  
Autor: Jennings - Lewis  
Edit.: Cecsca, 1975
- 3.- ENCICLOPEDIA DE TECNOLOGIA QUIMICA  
Autor: Kirk - Othmer  
Edit.: Uteha
- 4.- TESIS PROFESIONAL  
Título: Explotación y Aprovechamiento de la Energía Geo-  
térmica.  
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. (1973)
- 5.- PIPING HANDBOOK  
Autor: Crocker and King  
Edit.: Mc. Graw - Hill
- 6.- CENTRALES DE VAPOR  
Autor: G.A. Gaffert  
Edit.: Reverte, S.A.
- 7.- PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR  
Autor: Donald Q. Kern  
Edit.: Cecsca, (1973)  
Mc. Graw - Hill, Book Company, Inc. New, York.
- 8.- BOLETIN INFORMATIVO DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELEC  
TRICAS  
Volumen No. 1, del # 3  
Julio (1977)
- 9.- BOLETIN INFORMATIVO DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELEC  
TRICAS  
Volumen No. 2 del # 1  
Noviembre (1978)
- 10.- INFORME ANUAL DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRI--  
CAS (1978)
- 11.- CONFERENCIA PRESENTADA EN EL I SIMPOSIO NACIONAL DE TERMO  
CIENCIAS  
DIME, Facultad de Ingeniería (U.N.A.M.)  
Febrero (1976)

- 12.- TESIS PROFESIONAL  
Título: Teoría y Construcción de un Tubo de Calor  
Facultad de Ingeniería (U.N.A.M.) (1980)  
Autores: Esteban Tomás Espinosa Perea y J. Jesús Escamilla  
Hurtado
- 13.- TESIS PROFESIONAL  
Título: Producción de Energía Eléctrica mediante la utilización de la Energía Térmica del Mar, y la Aplicación de Ciclos Binarios con Amoníaco en Plantas Termoeléctricas.  
Facultad de Ingeniería, (U.N.A.M.) (1975)  
Autores: Rafael J. Huacuja Galvan, Hugo Armando Rodríguez Miranda y Antonio J. L. Roman de la Parra
- 14.- NASA TECHNOLOGY UTILIZATION PUBLICATIONS  
Theory of Heat Pipes  
Autor: T.P. Cotter  
Marzo 26 (1965)