



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE DISPOSITIVOS DE
ESTRANGULAMIENTO PARA LA EVAPORACIÓN
INSTANTÁNEA EN UN CICLO DE GENERACIÓN
GEOTERMOELÉCTRICA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

Luis Alberto Herrera Bonilla

DIRECTOR DE TESIS:

M. en I. Héctor Miguel Aviña Jiménez.



Ciudad Universitaria, México D.F., Marzo de 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Contenido

Nomenclatura.....	VIII
Símbolos griegos.....	IX
Introducción.....	X
Antecedentes.....	XI
Metodología empleada.....	XI
Validación de los modelos obtenidos.....	XI
Conclusiones.....	XI
Objetivo general.....	XII
Objetivos particulares.....	XII
1. ANTECEDENTES.....	2
1.1 La energía geotérmica.....	2
1.1.1 Geotermia.....	2
1.1.2 Semblanza de la energía geotérmica.....	2
1.2 Recursos geotérmicos.....	5
1.2.1 Clasificación.....	5
1.2.2 La Geotermia en el mundo.....	8
1.2.3 La Geotermia en México.....	9
1.2.4 Usos directos de la geotermia.....	9
1.3 Generación eléctrica.....	11
1.3.1 Ciclo a contrapresión.....	11
1.3.2 Ciclo a condensación.....	12
1.3.3 Ciclo Binario.....	12
1.4 Ciclo Binario de Evaporación Instantánea.....	13
1.4.1 Descripción y ventajas.....	13
1.4.2 Energía eléctrica para comunidades aisladas.....	15
2. EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA.....	19
2.1 Definición.....	19
2.2 Características.....	20
2.3 Caso de estudio.....	21
2.4 Evaporación instantánea en la geotermia.....	25



2.4.1 Ciclos de una y dos evaporaciones instantáneas	25
2.4.2 Destilación instantánea de múltiple etapa.....	26
2.5 Dispositivos empleados para la evaporación instantánea en la geotermia	27
2.5.1 Placa de orificio	27
2.5.2 Válvulas.....	32
3. METODOLOGÍA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL.....	36
3.1 El método científico	36
3.1.1 Enfoque de investigación cuantitativo y cualitativo	37
3.2 Experimentación.....	38
3.3 Medición	40
3.4 Análisis del Ciclo Binario de Evaporación Instantánea	40
3.5 Análisis teórico de los dispositivos de estrangulamiento para la evaporación instantánea.	43
3.5.2 Análisis placa de orificio.	45
3.5.2.1 La ecuación de Bernoulli.....	46
3.5.2.2 Cálculos.....	46
3.5.2.3 Diseño y manufactura.....	50
3.5.3 Análisis Válvula de compuerta.	51
3.5.3.1 Caracterización de la válvula de compuerta.	52
3.5.3.2 Cálculos.....	56
3.6 Sistema experimental de generación de vapor.....	59
3.7 Equipos utilizados en el SEGV.....	63
3.7.1 Calentador doméstico.....	63
3.7.1.1 Modificaciones hechas	63
3.7.2 Intercambiador de placas.....	64
3.7.3 Separador de flujos.....	65
3.8 Metodología del experimento.....	66
4. ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES	68
4.1 Sistema de instrumentación.	68
4.1.1 Sensores de presión.....	69
4.1.2 Sensor de temperatura.....	70
4.1.3 Medidor de flujo.	70



4.2 Mediciones del sistema en funcionamiento.....	71
4.2.1 Medición de flujo de líquido.....	72
4.2.2 Análisis de datos con la válvula de compuerta.....	73
4.2.3 Medición de flujo de vapor.....	79
4.2.4 Análisis de datos con placa orificio.....	80
5. CONCLUSIONES.....	82
5.1 Trabajo a futuro.....	83
Trabajos citados	89

Lista de Figuras

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Recinto original de hidroterapia en Grecia.....	3
Figura 1.2 Máquina usada en Larderello en 1904.....	4
Figura 1.3 Esquema de un sistema hidrotermal.....	5
Figura 1.4 Descripción gráfica de un sistema roca caliente.....	6
Figura 1.5 Volcán Chichonal en Chiapas. Ejemplo sistema magmático.....	7
Figura 1.6 Aplicaciones de los sistemas hidrotermales.....	10
Figura 1.7 Ciclo a contrapresión.....	11
Figura 1.8 Ciclo a condensación.....	12
Figura 1.9 Ciclo binario.....	13
Figura 1.10 Ciclo Binario de Evaporación Instantánea.....	14
Figura 1.11 Sistema Interconectado Nacional.....	16

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Dispositivo para destilación de leche mediante evaporación instantánea.....	20
Figura 2.2 Diagrama del equipo experimental.....	22
Figura 2.3 Descripción del recipiente de prueba.....	22
Figura 2.4 Influencia de la presión inicial sobre la transición de temperatura.....	23
Figura 2.5 Masa evaporada respecto a presión inicial.....	24
Figura 2.6 Masa evaporada respecto a temperatura inicial.....	24
Figura 2.7 Ciclo de doble evaporación instantánea.....	25
Figura 2.8 Diagrama temperatura-entropía de un ciclo con una evaporación instantánea.....	26
Figura 2.9 Diagrama de un sistema MSF de 3 etapas.....	27
Figura 2.10 Grupo de placas orificio utilizadas en la central geotermoeléctrica Los Azufres.....	28
Figura 2.11 Placas orificio instaladas en boca de pozo.....	28



Figura 2.12 Placa orificio para medir flujo de vapor.....	29
Figura 2.13 Placa orificio con bridas cónicas.....	29
Figura 2.14 Principio de operación placa orificio.....	30
Figura 2.15 Elementos de placa orificio.	30
Figura 2.16 Coeficientes de pérdidas promedio, para válvulas abiertas parcialmente. ..	33
Figura 2.17 Operación válvula de compuerta.	33
Figura 2.18 Válvula de mariposa.....	34
CAPÍTULO 3	
Figura 3.1 Diagrama real del Ciclo Binario de Evaporación Instantánea.	41
Figura 3.2 Diagrama T-S del Ciclo Binario de Evaporación Instantánea real.	43
Figura 3.3 Comportamiento general de la presión y velocidad del fluido a través de una placa orificio	44
Figura 3.4 Representación de los 8 tipos de patrón de flujo presentes en flujos bifásicos.	44
Figura 3.5 Esquema de sistema de placa orificio y puntos de análisis de Bernoulli.	47
Figura 3.6 Gráfica que muestra la relación del diámetro del orificio y la calidad de vapor obtenida.	49
Figura 3.7 Gráfica que muestra la relación entre el diámetro del orificio y la caída de presión provocada.	49
Figura 3.8 modelo tridimensional de bridas porta-placa.	50
Figura 3.9 modelo tridimensional de la placa orificio.....	50
Figura 3.10 Elementos del sistema bridas-placa orificio.....	51
Figura 3.11 Placa orificio con bridas instaladas.	51
Figura 3.12 Esquema de puntos de análisis para flujo a través de una válvula de compuerta.....	52
Figura 3.13 Válvula de compuerta marca rugo.....	53
Figura 3.14 Curva característica del evento 1.....	53
Figura 3.15 Curva característica del evento 2.....	54
Figura 3.16 Curva característica del evento 3.....	54
Figura 3.17 Válvula de compuerta instalada en el prototipo experimental.	55
Figura 3.18 Gráfica que muestra la relación entre la abertura de la válvula y la calidad obtenida.	57
Figura 3.19 Gráfica que muestra la relación entre la abertura de la válvula y la caída de presión provocada.	58
Figura 3.20 Gráficas con datos teóricos y experimentales de caída de presión.....	58
Figura 3.21 Esquemización del sistema de generación de vapor	60
Figura 3.22 Primera etapa del sistema experimental de generación de vapor.	60
Figura 3.23 Segunda etapa del SEGV.....	61
Figura 3.24 Diferentes vistas del segundo modelo del SEGV	61
Figura 3.25 Tercera etapa del sistema experimental.....	62



Figura 3.26 Acercamiento a válvula de compuerta y separador de flujos.	62
Figura 3.27 Válvula de alivio y termostato.....	63
Figura 3.28 Calentador doméstico modificado.....	64
Figura 3.29 Disposición de fluidos entre cada par de placas.....	64
Figura 3.30 Intercambiador de calor de placas marca DudaDiesel.....	65
Figura 3.31 Separador de vapor de la central geotermolétrica Los Azufres.....	65
Figura 3.32 Evolución de los modelos del separador de vapor.....	66
CAPÍTULO 4	
Figura 4.1 Configuración del sistema de instrumentación.....	68
Figura 4.2. Transductor de presión absoluta.....	69
Figura 4.3 Transductor de presión manométrico	70
Figura 4.4 Medidor de flujo rotativo	71
Figura 4.5 Lecturas de flujo volumétrico.....	72
Figura 4.6 Gráfica de presión evento 1	73
Figura 4.7 Gráfica de temperatura evento 1	74
Figura 4.8 Gráfica de presión evento 2.	74
Figura 4.9 Gráfica de temperatura evento 2.....	75
Figura 4.10 Gráfica de presión evento 3	75
Figura 4.11 Gráfica de temperatura evento 3.	76
Figura 4.12 Curva de calidad teórica para el evento 1.....	78
Figura 4.13 Curva de calidad del evento 2.	79
Figura 4.14 Curva de calidad del evento 3.	79
Figura 4.15 Mediciones de diferencia de presión en la placa de orificio.	80

Lista de Tablas

CAPÍTULO 1

Tabla 1.1 Clasificación de los sistemas geotérmicos según su temperatura	7
Tabla 1.2 Ranking mundial de capacidad geotérmica instalada.	9
Tabla 1.3 Capacidad geotérmica instalada en México.....	9

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1 Valores iniciales de presión y temperatura.....	23
---	----

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1 Datos del fluido y tubería para análisis	45
Tabla 3.2 resultados del análisis de la placa orificio.....	48
Tabla 3.3 Características de la válvula de compuerta	53
Tabla 3.4 Evaluación de dos modelos de grado diferente para determinar el coeficiente de pérdidas k.	55
Tabla 3.5 Resultados del análisis de la válvula de compuerta.	57



Tabla 3.6 Datos técnicos de tubería de cobre tipo M.....	59
CAPÍTULO 1	
Tabla 4.1 Configuración de medición del fluido de trabajo y fluido geotérmico	68
Tabla 4.2 Características transductor de presión Honeywell.....	69
Tabla 4.3 Características transductor de presión Veris	70
Tabla 4.4 Características sensor de presión.....	70
Tabla 4.6 Parámetros estadísticos de datos de flujo.....	72
Tabla 4.7 Condiciones iniciales evento 1	73
Tabla 4.8 Condiciones iniciales evento 2.	74
Tabla 4.9 Condiciones iniciales evento 3.	75
Tabla 4.10 Parámetros estadísticos evento 1.	76
Tabla 4.11 Parámetros estadísticos evento 2.	76
Tabla 4.12 Parámetros estadísticos evento 3.	77
Tabla 4.13 Comparación de datos teóricos y experimentales evento 1.....	78
Tabla 4.14 Comparación de datos teóricos y experimentales evento 2.....	78
Tabla 4.15 Comparación de datos teóricos y experimentales evento 3.....	78



Nomenclatura.

A_o	Área del orificio de la placa.
A_t	Área interna de la tubería.
d	diámetro característico.
D_e	Diámetro externo de la tubería.
D_n	Diámetro nominal de la tubería.
D_o	Diámetro del orificio de la placa.
D_t	Diámetro interno de la tubería.
EJ	Exa Joule. Unida de energía con prefijo del Sistema Internacional que indica un factor de 10^{18} .
f	Factor de fricción.
f_a	Fracción de abertura de la válvula.
g	Aceleración gravitatoria.
h	entalpía.
h_b	Carga debido a la bomba.
h_f	Carga debido a la fricción.
h_m	Carga debido a las pérdidas menores o localizadas.
h_t	Carga debido a la turbina.
in	Pulgada. Unidad de medida de longitud en el Sistema Inglés.
k	Coefficiente de pérdidas.
KPa	Kilo Pascal. Unidad de presión con prefijo del Sistema Internacional de Unidades que indica un factor de 10^3 .
L	Longitud característica.
\dot{m}	Flujo másico.
MW	Mega Watt. Unidad de potencia con prefijo del Sistema Internacional de Unidades que indica un factor de 10^6 .
m_{ev}	Masa evaporada.
MPa	Mega Pascal. Unidad de presión con prefijo del Sistema Internacional de Unidades que indica un factor de 10^6 .



P	Presión a lo largo de la línea de corriente.
PSI	Libra por pulgada cuadrada. Unidad de presión.
Q	Flujo volumétrico.
Re	Número de Reynolds.
v	Velocidad promedio del flujo.
X	Calidad de vapor.
z	Altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.
°C	Grado centígrado. Unidad de medida de temperatura.

Símbolos griegos.

ρ	Densidad del fluido.
β	Relación entre el diámetro del orificio de la placa y el diámetro interno de la tubería.
ΔV	Decremento del volumen de líquido.
ΔP	Diferencia de presiones.
ν	Viscosidad cinemática del fluido.
μ	Viscosidad dinámica del fluido.



Introducción.

Desde hace unas cuantas décadas se ha detectado un incremento en la problemática de contaminación y dificultades para extraer los recursos fósiles, sin embargo está claro que la oferta y consumo energético tienen una estrecha relación con la calidad de vida humana, además de que el abastecimiento energético sustentable, económico y seguro de una nación es clave para su crecimiento, independientemente de cual sea su situación de desarrollo.

Por otra parte, también hay una relación directa entre el consumo de energía y las emisiones de gases invernadero que propician el calentamiento global y debido a los factores mencionados anteriormente es que se le ha dado a las energías alternas un gran estímulo para su uso, desarrollo e innovación.

Una de esas fuentes de energía alterna es la geotérmica, la cual es un recurso con gran potencial en México y muchas otras partes del mundo, de tal forma que si se aprovechará correctamente, sería capaz de abastecer gran parte de la demanda energética.

El aprovechamiento de la energía geotérmica se logra mediante la implementación de centrales eléctricas que operan bajo el fundamento de ciclos termodinámicos conocidos como geotermoeléctricos. Dentro de este tipo de ciclos existe uno conocido como ciclo de evaporación instantánea, en el cual, como su nombre lo indica, se evapora parte del fluido caliente, con la finalidad de aprovechar una cantidad adicional de energía.

El grupo multidisciplinario IIDEA (Desalación y Energías Alternas), propone la implementación de un nuevo ciclo conocido como Ciclo Binario de Evaporación Instantánea (CBEI), en el cual se puede aprovechar los recursos geotérmicos clasificados como de baja entalpía.

Dentro de los diferentes equipos que integran el sistema completo, se encuentra un dispositivo de estrangulamiento, que como su nombre lo dice, restringe el flujo de un fluido en una corriente, lo cual provoca una caída de presión repentina. En este ciclo particularmente se propone el uso de dos dispositivos, una placa de orificio, el cual se denomina como un elemento deprimógeno, ya que su instalación produce una caída de presión considerable y una válvula de compuerta, la cual, si se le opera abierta parcialmente puede llegar a provocar despresurizaciones grandes.

El presente trabajo tiene como objetivo el caracterizar ambos dispositivos, realizar un análisis general de su funcionamiento bajo las condiciones solicitadas por el ciclo, obtener modelos que describan su comportamiento y funcionen para predecir las propiedades termodinámicas de los fluidos al interactuar con ellos. Y por último, evaluar



los modelos obtenidos, mediante experimentación para finalmente comparar el desempeño de cada uno de ellos y seleccionar el que mejor sea conveniente para el funcionamiento correcto del ciclo.

El contenido de este trabajo de tesis se estructura de la manera siguiente:

Antecedentes.

En lo que corresponde al capítulo 1, se realiza un estado del arte de la geotermia, empezando por una corta semblanza de los primeros usos y aprovechamientos de este recurso. Se describe brevemente el concepto de los principales ciclos termodinámicos bajo los cuales operan las centrales eléctricas. Se describe la situación actual de México como generador de electricidad a partir de los recursos geotérmicos y finalmente se explica la versatilidad de la geotermia al poder ser utilizada en diversos procesos industriales.

En el capítulo 2 se realiza un segundo estado del arte, pero en esta ocasión de la evaporación instantánea, sus aplicaciones directamente en la geotermia y una búsqueda bibliográfica del material existente dentro de la literatura, como ecuaciones de gobierno, correlaciones existentes y antecedentes.

Metodología empleada.

Esta sección corresponde al capítulo 3, primero se explica la metodología de análisis empleada para el estudio teórico de ambos dispositivos, la explicación de la teoría que sirvió de soporte, las consideraciones realizadas y los cálculos correspondientes.

Por otra parte, se explica la metodología experimental realizada, el modelo prototipo construido, los equipos utilizados, las consideraciones hechas y las modificaciones que sufrieron algunos de los elementos que conforman el sistema.

Validación de los modelos obtenidos.

Este apartado corresponde al capítulo 4, en donde se realiza un análisis de los datos obtenidos experimentalmente mediante gráficas y tablas, se describen brevemente los instrumentos de medición empleados así como su funcionamiento. Por último se hace una comparación entre los resultados obtenidos analíticamente y los datos obtenidos a partir de la experimentación.

Conclusiones.

Finalmente se encuentra un apartado en donde se determina el cumplimiento parcial o total de los objetivos planteados al principio de este trabajo y se correspondiente justificación. Además se enlista una serie de aportaciones futuras, para finalmente incluir un apartado de anexos.



Objetivo general.

Caracterizar el comportamiento de dos dispositivos de estrangulamiento una placa de orificio y una válvula de compuerta, utilizados como instrumentos de evaporación instantánea, así como evaluar experimentalmente su desempeño para la generación de vapor en un sistema prototipo de un ciclo de generación geotermoeléctrica.

Objetivos particulares.

- Realizar un estado del arte acerca de la geotermia y la evaporación instantánea.
- Analizar termodinámicamente el CBEI, con el propósito de definir las condiciones de operación bajo las cuales trabajaran los dispositivos de estrangulamiento.
- Caracterizar teóricamente el comportamiento de ambos dispositivos de estrangulamiento.
- Obtener modelos que describan el comportamiento de ambos dispositivos.
- Diseñar y construir un par de bridas porta placa orificio y un juego de placas con distintos orificios.
- Seleccionar una válvula de compuerta que exista comercialmente para tubería de media pulgada.
- Realizar experimentación, probando ambos dispositivos.
- Analizar gráfica y estadísticamente la información obtenida a partir de la experimentación.
- Evaluar los modelos obtenidos y determinar la desviación entre las predicciones y las mediciones hechas.
- Seleccionar el dispositivo cuyas características sean las más óptimas para el correcto funcionamiento de Ciclo Binario de Evaporación Instantánea.

CAPÍTULO 1

En este capítulo se introduce al lector en el tema de la energía geotérmica, la clasificación de sus recursos, los ciclos de generación eléctrica y usos directos que se utilizan comúnmente en la práctica del aprovechamiento de la energía geotérmica. Además, funciona como una primera justificación de la necesidad de estudiar el fenómeno de la evaporación instantánea en la geotermia.

1. ANTECEDENTES



1. ANTECEDENTES

1.1 La energía geotérmica

La energía geotérmica es una fuente alternativa a los recursos fósiles convencionales, la cual tiene un potencial enorme e inagotable a nivel mundial, tal que si fuera la única fuente para generar electricidad, sería capaz de satisfacer la demanda energética de todo el planeta, además de que se trata de una energía muy versátil ya que también puede ser utilizada directamente en procesos industriales, en sistemas de calefacción, aire acondicionado y también en la agricultura para cultivo de plantas y animales.

1.1.1 Geotermia

De manera general la geotermia es el calor almacenado y generado en el interior del planeta y de manera técnica se le considera como el estudio y aprovechamiento de tal recurso térmico, siendo transportado por medio de roca y en algunos casos fluidos, desde el interior de la Tierra hasta la corteza, dando origen a lo que se conoce como sistemas geotérmicos.

La energía geotérmica es una fuente alterna a los recursos fósiles convencionales y las emisiones de CO₂ generadas mediante el aprovechamiento de este recurso, son prácticamente nulas. También es considerada una fuente de energía renovable, ya que si se aprovecha adecuadamente, los tiempos de vida útil de los yacimientos geotérmicos son muy grandes comparados con una vida humana.

La energía que se encuentra en el interior de la tierra proviene del calor acumulado en su núcleo durante el proceso de formación del mismo planeta y en parte de la radiación emitida por la desintegración de elementos químicos radiactivos que forman el núcleo. Este calor, a su vez, puede provocar fenómenos naturales a gran escala como los volcanes, los géiseres y las fuentes termales.

Se estima que el calor total almacenado en el interior de planeta es de 12.6×10^{12} EJ y el que se encuentra a una profundidad aproximada de 50 Km, es de 5.4×10^9 EJ. Esta energía se disipa naturalmente a la superficie a una rapidez de 1388 EJ al año y sólo para hacer una comparativa, el consumo mundial de energía primaria en el año 2011 fue de 532 EJ, de esta forma se puede observar claramente el potencial enorme que posee la energía geotérmica. [1]

1.1.2 Semblanza de la energía geotérmica

A lo largo de los años se le ha dado múltiples usos al calor terrestre, una de las aplicaciones más antiguas es la balneología, hace poco más de 10 000 años los Paleo Indios de América del norte ya usaban las aguas termales para cocinar sus alimentos y utilizaban sus minerales para fines medicinales, posteriormente los griegos y romanos

utilizaban los fenómenos termales en su beneficio, se tenía la antigua creencia que las aguas termales poseían propiedades curativas por su efecto relajante para los músculos dañados, es así como las termas alcanzan una gran popularidad en todo el Imperio Romano y no solamente como centros de salud, sino también como centros de recreación e intercambio social, equivalentes a una cafetería actual. Fue así como los balnearios, hidrotratamientos y baños de chorro se extendieron por toda Europa y posteriormente a otros continentes, teniendo tal éxito que prosperan hasta nuestros días.

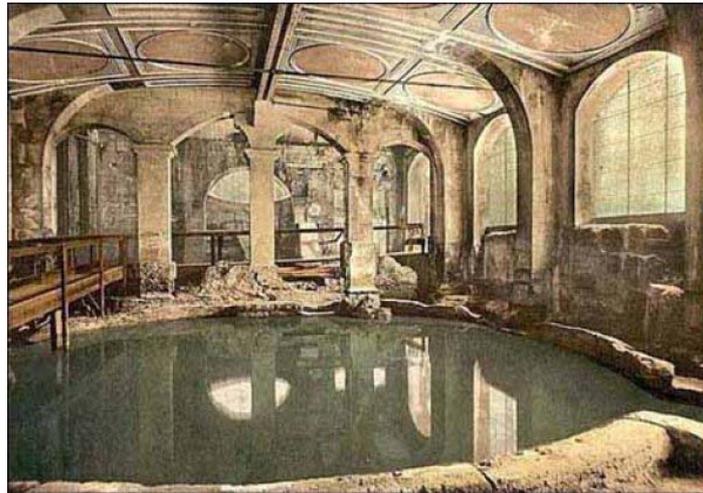


Figura 1.1 Recinto original de hidroterapia en Grecia. [2]

El primer indicio del uso de la geotermia para la calefacción y suministro de agua caliente se dio en Francia, cuando en el año 1330 ya existía una red urbana de distribución de agua caliente, los habitantes del poblado Chaudes-Aigues, tenían que pagar una tasa por su mantenimiento. Este servicio también se ocupaba para lavar lana y pieles. Otra aplicación muy antigua fue la obtención de minerales a partir de la actividad térmica natural, desde mediados del siglo XIII hasta finales del XIV, en la región de Volterra, Toscana en Italia, existían lagunas de agua caliente las cuales emanaban vapor a más de 100 °C, este recurso fue explotado para extraer ácido sulfúrico, vitriolo y alumbre, los cuales utilizaban para preparar esmaltes con los que decoraban vasos.

Una aplicación más, fue la de Hernán Cortés al explotar los minerales geotérmicos con fines bélicos. Curiosamente en el proceso de conquista de los aztecas, el volcán Popocatepetl, después de siglos de inactividad, hizo erupción justo en el momento en que las pequeñas tropas españolas avanzaban hacia la ciudad capital del Imperio de Moctezuma. Cortés muy oportunista, fabricó su propia pólvora utilizando como ingrediente el azufre localizado cerca del cráter del volcán, después de que terminara su actividad. Detalles ingeniosos como este fueron los que hicieron posible la conquista de un gran imperio por una pequeña cantidad de hombres.

Fue así como por muchos años el hombre se conformó con utilizar el calor térmico que llegaba de manera natural a la superficie del planeta. El adelanto más

sorprendente que se logró en cuanto a la explotación del calor terrestre, se dio cuando el Príncipe Piero Ginori Conti impulsó la generación de energía eléctrica a partir del vapor geotérmico en 1904 en Larderello. Primero se utilizaron máquinas reciprocantes alimentadas directamente con fluido geotérmico, pero tuvieron corta vida debido al severo ataque químico que sufrieron. Consecuentemente, se utilizaron intercambiadores de calor para evaporar otro fluido a partir del recurso geotérmico, se mejoró la tecnología de materiales utilizados para la manufactura de las unidades impulsoras y de esta forma se superaron las dificultades químicas que se tenían. Finalmente se logró en 1913 poner en servicio una central de 250 kW y de allí en adelante se le expandió progresivamente en cuanto a tamaño y número de unidades generadoras, logrando en la década de 1940 una capacidad de aproximadamente 130 MW, esta energía servía en esos años para abastecer al sistema italiano de ferrocarriles.



Figura 1.2 Máquina usada en Larderello en 1904. [3]

Esta planta, que para ese entonces era la única de su clase en todo el mundo, fue destruida totalmente por las tropas alemanas durante su retirada al concluir la Segunda Guerra Mundial. Estas experiencias sirvieron como una clara demostración del valor comercial e industrial de la energía geotérmica y dio origen a una nueva técnica de explotación que se ha desarrollado significativamente desde entonces. Después de Larderello, otros países siguieron los pasos de Italia; en 1919 fueron perforados los primeros pozos en Japón, seguidos por los pozos en la región The Geysers, en California EUA y luego en el Tatio, Chile. Tuvieron que pasar décadas desde Larderello para que otro país siguiera el trabajo de Conti, en 1958 entró en operación una pequeña planta en Nueva Zelanda, después en 1959 en México, en 1960 en Estados Unidos y así sucesivamente en diferentes países del mundo. [4]

Como se puede observar, históricamente la geotermia resulta una opción atractiva y que compite con las fuentes de energía convencionales de producción eléctrica, además muestra una versatilidad al poder ser empleada en diferentes procesos.

1.2 Recursos geotérmicos

1.2.1 Clasificación

Los recursos geotérmicos se forman por la acumulación prolongada de calor en zonas denominadas sistemas geotérmicos, a pocos kilómetros de profundidad. Se pueden clasificar según su tipo, temperatura y en el caso de los hidrotermales, dependiendo la fase en la que se encuentre el fluido geotérmico. A continuación se describirá brevemente cada uno de ellos:

Sistemas hidrotermales. Son sistemas de agua muy caliente y en algunas ocasiones existe vapor, se forman según las condiciones geológicas. La corteza terrestre se calienta debido, principalmente, a una intrusión de magma, después agua subterránea pasa por estas rocas calientes, formando un acuífero de agua caliente y vapor a alta presión. Este yacimiento se puede aprovechar perforando un pozo hasta llegar a la fuente acuífera. Los sistemas de esta naturaleza están formados por tres elementos principales:

- Fuente de calor. Puede ser una intrusión magmática a temperatura muy alta, mayor a 600 °C situada a profundidades de entre 5 y 10 kilómetros.
- Reservorio. Es un subsistema formado por un volumen de rocas calientes y permeables de las cuales el fluido geotérmico extrae el calor, un grupo de rocas impermeables para impedir que el calor se disipe y también está conectado a un área de recarga superficial, para que el agua meteórica reemplace el fluido que se extrae mediante los pozos.
- Fluido. Es el medio de transferencia de calor, principalmente mediante la convección, esta tiene lugar debido al calentamiento y expansión de los fluidos. El calor que es suministrado es la energía que acciona el sistema. El fluido calentado de menor densidad tiende a ascender y a ser reemplazado por fluido frío de mayor densidad, proveniente de los márgenes del sistema.

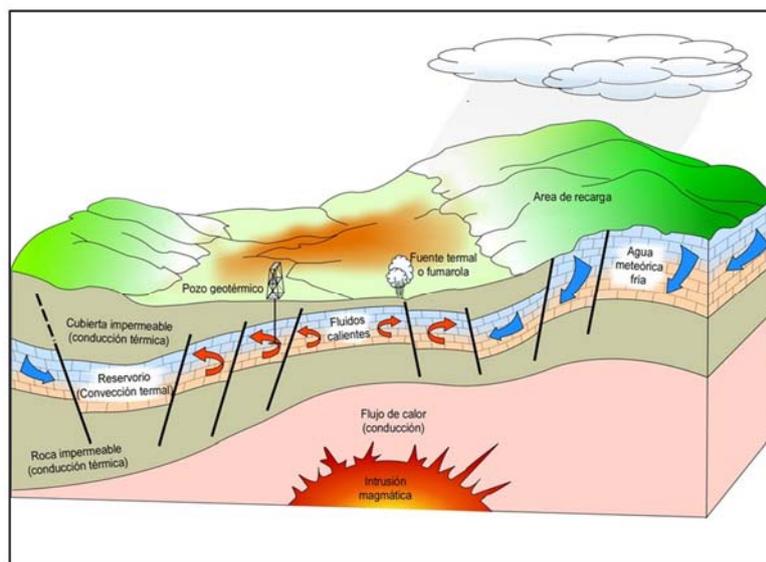


Figura 1.3 Esquema de un sistema hidrotermal. [3]

Sistemas de roca caliente. Son sistemas que se encuentran en ausencia de agua que circula a través de las rocas y para aprovechar estos sistemas, se utiliza un método de inyección de agua a alta presión a través de los pozos hasta llegar a un grupo de rocas calientes y compactas, logrando su fracturamiento y así formar un yacimiento artificial. Este reservorio es posteriormente alcanzado mediante un segundo pozo, del cual se extrae el fluido geotérmico caliente. El sistema completo consiste de los siguientes elementos:

- Primer pozo. Es utilizado para el fracturamiento hidráulico y para inyectar el agua fría.
- Reservorio artificial.
- Segundo pozo. Utilizado para extraer el agua caliente. [3]

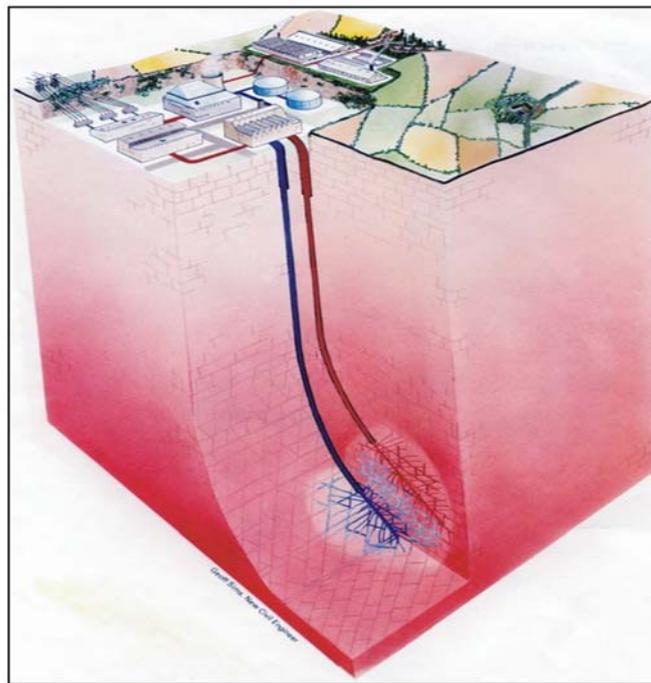


Figura 1.4 Descripción gráfica de un sistema roca caliente. [1]

Sistemas magmáticos. Son sistemas de roca fundida existentes en las cámaras magmáticas de los volcanes, son muy atractivos ya que se encuentran a temperaturas mayores a los 800 °C pero desafortunadamente actualmente no se cuenta con la tecnología de materiales adecuada para explotar comercialmente estos sistemas.

En un futuro no muy lejano se contará con la tecnología y materiales necesarios para soportar la corrosión y altas temperaturas para extraer la cantidad enorme de energía que se encuentra en las cámaras de los volcanes activos.



Figura 1.5 Volcán Chichónal en Chiapas. Ejemplo sistema magmático.

Sistemas geopresurizados. Estos sistemas se encuentran en las rocas sedimentarias de la plataforma continental. Consisten en hidratos de metano atrapados en los sedimentos. Los hidratos son moléculas cristalinas de gases, encerradas por moléculas de agua, las cuales mantienen la estabilidad de los hidratos gracias a la presión que ejercen sobre ellos. El valor de esta presión es uno intermedio entre la presión hidrostática y la litostática.

La energía de estos yacimientos tiene un doble aprovechamiento, por un lado, se puede explotar el fluido presurizado y por otro la molécula de metano liberada. Esta segunda aplicación resulta un reto tecnológico ya que se sabe que el metano es un gas responsable de efecto invernadero y también, la extracción masiva de metano podría provocar deslizamientos de placas debido a que afectaría seriamente a la estabilidad de los sedimentos. [5]

A su vez, los sistemas geotérmicos hidrotermales se pueden clasificar según la entalpía de los fluidos que transportan el calor desde las rocas hasta la superficie. Para esta clasificación, la entalpía se considera proporcional a la temperatura a la que se encuentra el fluido en el yacimiento. Los sistemas se clasifican como de alta, media y baja entalpía, la siguiente tabla muestra la clasificación completa de acuerdo a tres autores diferentes:

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

Tabla 1.1 Clasificación de los sistemas geotérmicos según su temperatura [3]



Con esta clasificación es posible conocer de manera inmediata, cuanta energía podemos obtener del yacimiento geotérmico. Estos sistemas son muy versátiles, ya que además de aprovecharse para la generación de energía eléctrica, tiene varias aplicaciones donde incluso se puede utilizar recursos de media y baja entalpia.

1.2.2 La Geotermia en el mundo.

Los países que poseen mayores recursos geotérmicos en el mundo son aquellos que se ubican dentro o cerca de los bordes de las placas tectónicas, que es donde es más probable la formación de sistemas geotérmicos ya que también ahí suelen ocurrir fenómenos de sismicidad y vulcanismo. Alrededor de 80 países en el mundo, utilizan la geotermia para diferentes aplicaciones, las cuales se han mencionado anteriormente, pero de esos 80 solamente 24 países son los que emplean de manera directa para la generación de energía eléctrica.

En total, estos países tienen una capacidad geotermoeléctrica instalada de casi 12 mil megawatts, siendo México el cuarto lugar en este rubro. La siguiente tabla contiene datos actuales, de finales del 2013. Cabe mencionar que esa capacidad es la instalada, la efectiva u operativa es la que está relacionada con el factor de planta que en México, para las centrales geotermoeléctricas, en promedio, es de aproximadamente 80%, lo cual quiere decir que en un año, se genera ese porcentaje de energía del total de la capacidad instalada. [1]

	PAÍS	MW
1	Estados Unidos	3,389.0
2	Filipinas	1,848.0
3	Indonesia	1,341.0
4	México	1,017.4
5	Italia	875.5
6	Nueva Zelanda	842.6
7	Islandia	664.4
8	Japón	537.0
9	Kenia	248.5
10	Costa Rica	207.1
11	El Salvador	204.4
12	Turquía	166.6
13	Nicaragua	149.5
14	Rusia	81.9
15	Papúa-Nueva Guinea	56.0
16	Guatemala	48.0
17	Portugal	28.5
18	China	27.0
19	Francia	17.0
20	Alemania	11.9
21	Etiopía	8.0
22	Austria	1.4
23	Australia	1.0



24	Tailandia	0.3
TOTAL		11, 772.0

Tabla 1.2 Ranking mundial de capacidad geotérmica instalada. [1]

1.2.3 La Geotermia en México

Como se ha mencionado México ocupa el cuarto lugar en la generación eléctrica a partir de geotermia aportando un 2% los más de 52 000 MW de la capacidad total del país. México cuenta con cuatro centrales geotermoeléctricas y un campo con algunos pozos perforados listo para su aprovechamiento. La explicación de los ciclos bajo los cuales operan las centrales en la geotermia se realizará más adelante. A continuación se describen las centrales mencionadas:

- Cerro Prieto. Se encuentra en el estado de Baja California, está constituida por 13 unidades de diferentes capacidades, 110, 37.5, 30 y 25 MW. Doce de ellas son unidades que trabajan a condensación con un solo *flasheo* y una trabaja con doble *flasheo*.
- Los Azufres. Ubicada en el estado de Michoacán, está constituida por cinco unidades a condensación de un *flasheo*, siete a contrapresión y dos más que operan con ciclo binario.
- Los Humeros. Esta central se encuentra en el estado de Puebla, está integrada por ocho unidades a contrapresión y dos a condensación. Cinco de las ocho unidades a contrapresión, se utilizan como respaldo cuando alguna otra se le da mantenimiento.
- Tres Vírgenes. Esta pequeña central se ubica en el estado de Baja California Sur y cuenta con dos unidades a condensación de un solo *flasheo*.
- Cerritos Colorados. Este campo geotérmico se encuentra en Jalisco y no cuenta con plantas en operación pero si con varios pozos perforados y un potencial calculado de 75 MW. [1]

La siguiente tabla resume las capacidades de estas centrales.

CAMPO	CAPACIDAD INSTALADA (MW)	CAPACIDAD EN OPERACIÓN (MW)
Cerro Prieto	720	570
Los Azufres	194	191
Los Humeros	93.4	68.4
Las Tres Vírgenes	10	10
Totales	1, 017.4	839.4

Tabla 1.3 Capacidad geotérmica instalada en México. [1]

1.2.4 Usos directos de la geotermia.

Como se mencionó anteriormente, la energía geotérmica es tan versátil que se puede utilizar en diferentes procesos además de la generación de energía eléctrica, los

recursos hidrotermales de baja entalpía son los que generalmente se emplean en tales casos ya que se aprovecha directamente el calor de los fluidos geotérmicos.

Dependiendo de la temperatura a la que se encuentre el fluido, se le pueden dar diversas aplicaciones, donde diferentes sectores, como la industria, la agricultura y la salud, pueden beneficiarse de una fuente de calor segura, limpia y económica. La siguiente figura, muestra algunas aplicaciones de los sistemas hidrotermales, según su temperatura. Cabe destacar que a pesar de que las fuentes de entalpía baja son insuficientes energéticamente para la generación de electricidad, estas se encuentran en mayor cantidad en nuestro país y representan un gran potencial energético mal aprovechado. También su extracción se da a profundidades menores y en consecuencia su costo se reduce. [6]

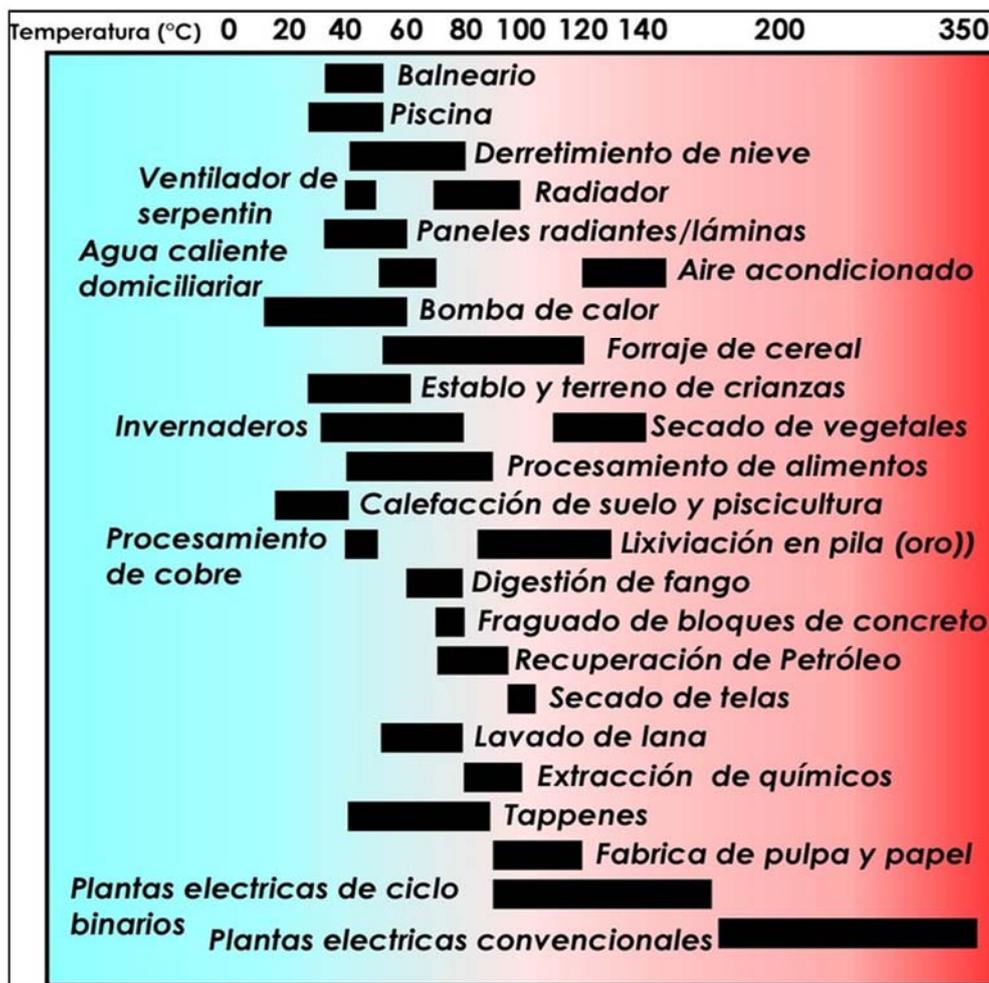


Figura 1.6 Aplicaciones de los sistemas hidrotermales. [3]

1.3 Generación eléctrica

El proceso de convertir calor geotérmico en energía eléctrica, implica implícitamente una ineficiencia comparada con otros sistemas convencionales, a pesar de esto, la generación de electricidad ha sido y continuará siendo la forma principal de desarrollo tecnológico y científico de la geotermia. Lo anterior se debe a diversas razones, una de ellas es que los campos geotérmicos de alta entalpía pueden explotarse más rápidamente que los de baja, a pesar de encontrarse limitados en cuanto a número y localización. Esto los hace más redituables al ofrecer mayores ganancias y recompensas comerciales. A continuación se describen los diversos ciclos termodinámicos que se utilizan para la generación de electricidad a partir de la geotermia. [4]

1.3.1 Ciclo a contrapresión.

Este es el ciclo más simple y barato en cuanto a inversión inicial de todos los ciclos termodinámicos utilizados en la geotermia, ya que no se requieren muchos equipos para su instalación. El vapor se utiliza directamente de los pozos secos o si es el caso, después de la separación en pozos húmedos, se hace pasar sencillamente por la turbina y el vapor es rechazado directamente a la atmósfera.

A pesar de ser poco eficientes, estos sistemas se utilizan constantemente como plantas piloto, plantas de reserva, para suministros locales y en algunos casos para cubrir las cargas pico. También es necesario utilizar este tipo de ciclos cuando la cantidad de gases no condensables que contiene el vapor geotérmico, es mayor al 50%. [4]

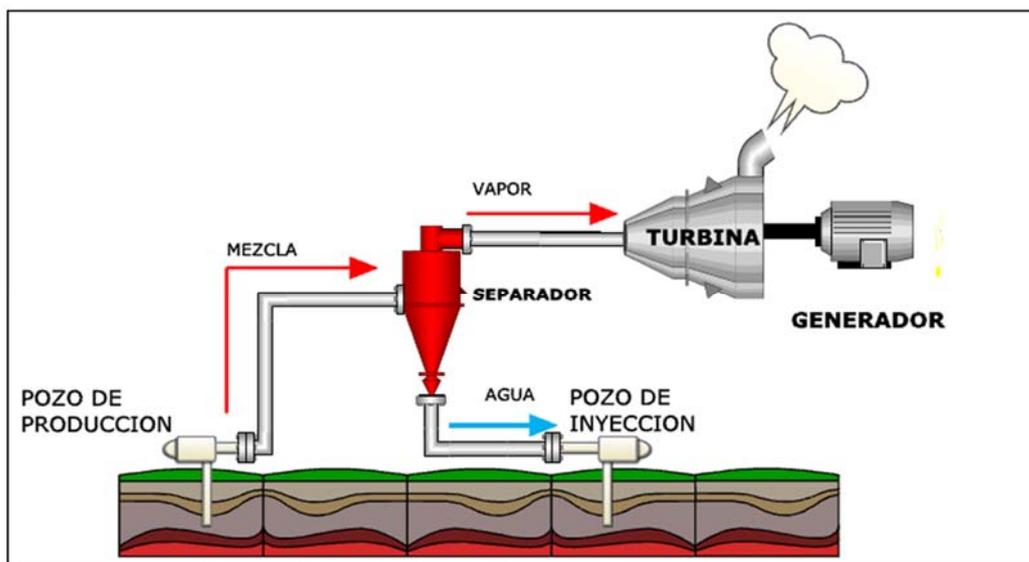


Figura 1.7 Ciclo a contrapresión.

1.3.2 Ciclo a condensación.

En este ciclo, similar al de contrapresión, el recurso geotérmico extraído de pozo se hace pasar por un separador de flujos donde el vapor se dirige a la turbina la cual está acoplada a un generador eléctrico. Después el vapor es transportado a un condensador, dicho equipo tiene una cámara a presión de vacío y este es generado por medio de dispositivos conocidos como eyectores o bombas de vacío, además del vacío generado por el mismo proceso de condensado. El vapor se condensa por medio de otro fluido, el cual es enfriado en una torre de enfriamiento. El uso del condensador hace que la energía extraída del fluido geotérmico sea mayor y por lo tanto la eficiencia del ciclo aumenta.

La fracción de líquido caliente después del separador y el líquido condensado, son reinyectados al pozo. [7]

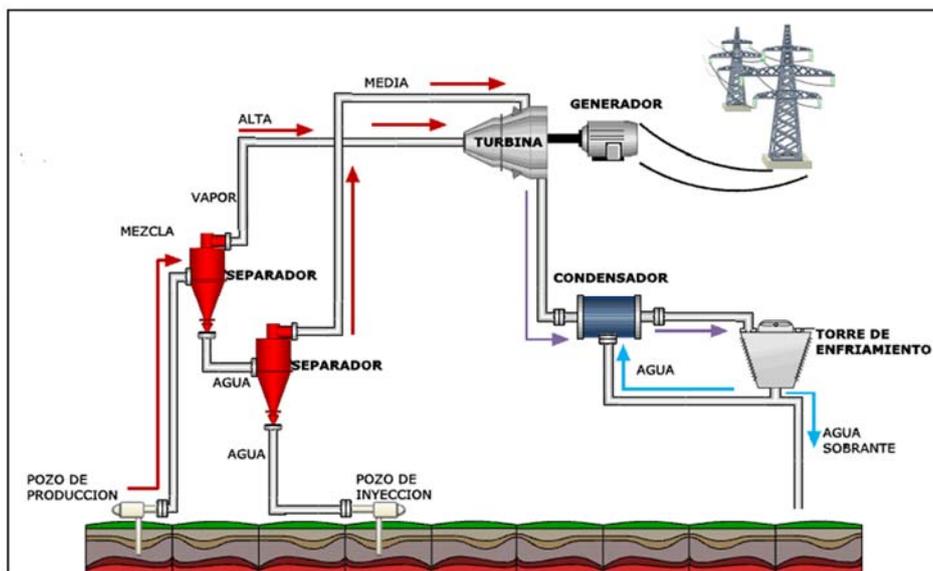


Figura 1.8 Ciclo a condensación.

1.3.3 Ciclo Binario.

El fluido geotérmico en ocasiones está contaminado de gases y minerales disueltos, debido a esto no es conveniente hacerlo pasar directamente a la turbina. El ciclo binario nació como la solución a este problema y también surge como una oportunidad para aprovechar la energía que aún contiene el fluido después de la separación en una planta convencional. En ciclo binario, se utiliza un fluido secundario, generalmente se utiliza un fluido refrigerante debido a su bajo punto de ebullición aunque el uso de estos fluidos tiene como desventaja que son volátiles, algunas veces tóxicos e inflamables y su almacenamiento debe realizarse con gran cuidado. El fluido secundario es calentado y evaporado con un intercambiador de calor a partir del fluido geotérmico, después el vapor es llevado a la turbina para que realice el trabajo mecánico y mueva los álabes de la turbina. Finalmente es condensado para después reiniciar el ciclo.

El uso de esta tecnología tiene diversas ventajas como; la posibilidad de utilizar recursos geotérmicos de baja y media entalpía y fluidos que son químicamente agresivos o que contienen un alto porcentaje de gases no condensables. De esta forma los gastos mayores de mantenimiento se enfocan únicamente al intercambiador de calor. Cabe mencionar que en este tipo de ciclos se utilizan turbinas de tipo axial, en las cuales el paso del vapor se realiza en la misma dirección del eje de la turbina. [8]

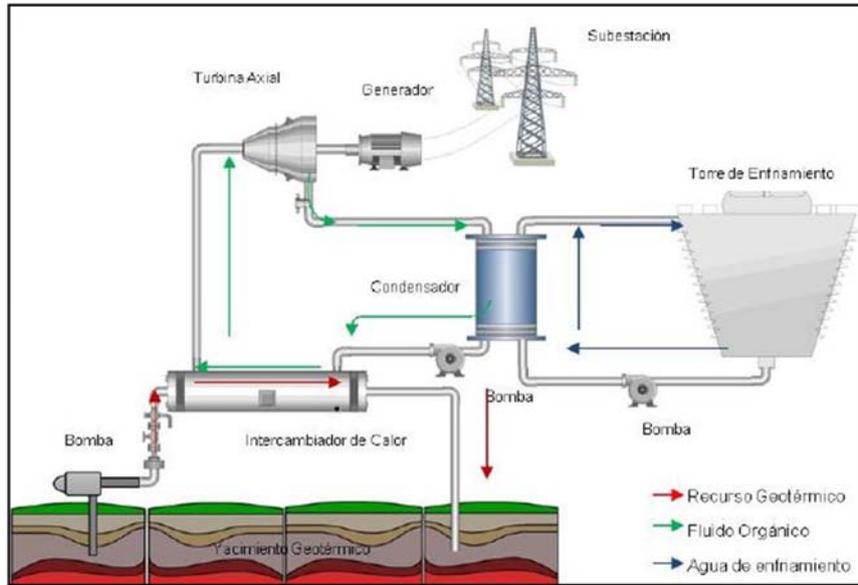


Figura 1.9 Ciclo binario.

1.4 Ciclo Binario de Evaporación Instantánea

El Ciclo Binario de Evaporación Instantánea es una variante del ciclo binario convencional. Al igual que un binario, el ciclo propuesto utiliza dos fluidos, uno es el que se extrae del pozo y el otro no es un fluido orgánico, sino agua desmineralizada. Otra modificación es que el sistema de generación de vapor está constituido por un intercambiador de placas planas, un dispositivo de estrangulamiento y un separador de flujos centrífugo, dicho sistema sustituye al intercambiador de calor de un ciclo binario convencional.

Este ciclo es una propuesta del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, elaborado por el grupo IIDEA (Desalación y energías Alternas). Con este ciclo se pretende mejorar al binario tradicional, obteniendo un ciclo más eficiente, práctico y compacto.

1.4.1 Descripción y ventajas del CBEI.

Tal como en ciclo binario, el fluido geotérmico le transfiere energía al fluido de trabajo, en este caso es por medio de un intercambiador de placas, al salir de este dispositivo, el fluido de trabajo se encuentra en condición de líquido saturado. Gracias a que el agua desmineralizada se encuentra a una presión alta, esta no se evapora dentro

del intercambiador de calor, debido a que su punto de ebullición se modifica. Posteriormente se le hace pasar por un dispositivo de estrangulamiento el cual hace que la presión del fluido caiga drásticamente, por debajo de la presión de saturación correspondiente a la temperatura inicial y consecuentemente parte de él se evapora, este fenómeno se le conoce como evaporación instantánea y será explicado detalladamente en el siguiente capítulo. El dispositivo de estrangulamiento puede ser cualquiera que provoque una caída de presión considerable, en el presente trabajo se analizarán dos dispositivos diferentes: una placa de orificio y una válvula de compuerta.

Después de pasar por el dispositivo de estrangulamiento, el fluido de trabajo se encuentra como una mezcla de vapor y líquido. Se le hace pasar por un separador de flujos centrífugo para dirigir el vapor a la turbina. Esta turbina tiene la cualidad de ser de altas revoluciones ya que el vapor generado contiene muy poca energía, no existe comercialmente y actualmente se encuentra en proceso de diseño. Después de pasar por la turbina, el vapor es condensado y finalmente es colectado junto con el líquido separado del vapor para finalmente reiniciar el ciclo.

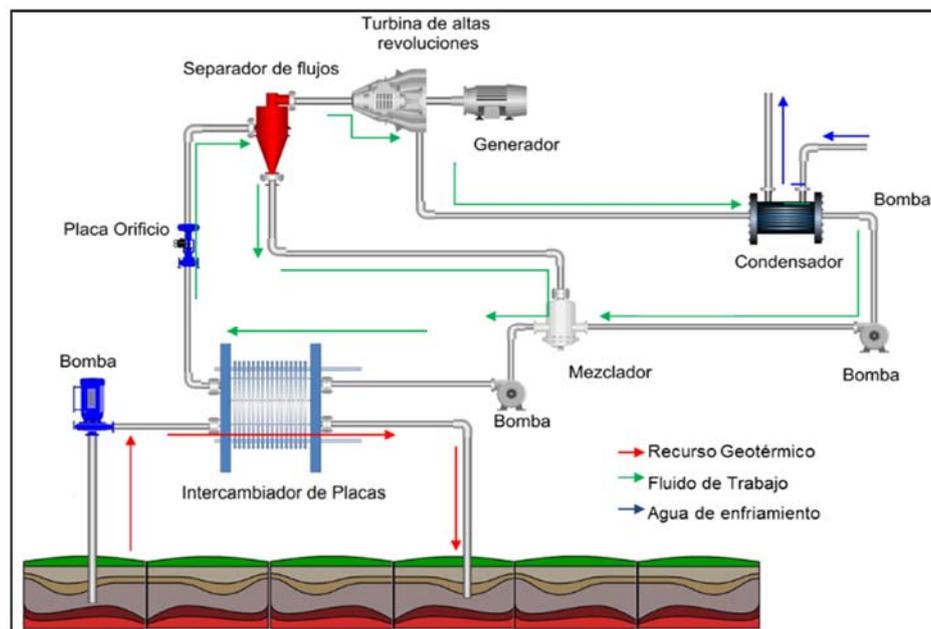


Figura 1.10 Ciclo Binario de Evaporación Instantánea.

Con el uso de un intercambiador de placas, la transferencia de calor de un fluido a otro se lleva a cabo con mayor eficiencia al ser mayor el área de contacto. Estos equipos permiten un acercamiento de temperaturas de hasta 1 °C y la pérdida de presión que



genera es relativamente baja, por otra parte se puede contar con placas de repuesto y de esa forma sustituirlas mientras se le da mantenimiento a las otras placas.

Al utilizar agua desmineralizada como fluido de trabajo se evitan los problemas adheridos al uso de fluidos orgánicos, como su manejo complicado que requiere de personal especializado y que las pérdidas por fugas de dichos fluidos es de 7% por año aproximadamente.

Con el sistema de generación de vapor propuesto, se intenta reducir el espacio ocupado por esta microplanta y gracias al separador empleado se logra una separación del 99.9 % del líquido. [9]

1.4.2 Energía eléctrica para comunidades aisladas.

Durante muchos años, el sistema energético mexicano se ha basado fundamentalmente en los hidrocarburos. Este sector ha tenido un desarrollo acelerado en los últimos 50 años, haciendo de Pemex una de las compañías petroleras más grandes del mundo, logrando que México se encuentre dentro de los primeros lugares en exportación y producción de petróleo.

Sin embargo, existen comunidades aisladas y regiones remotas del país donde se les ha privado del suministro suficiente de energía eléctrica, trayendo consigo un estancamiento en el desarrollo económico y social para dichas comunidades. Una de las causas de este padecimiento es la falta de infraestructura y poca demanda energética en estos lugares, un ejemplo de tal situación es el caso de la península de Baja California, donde en gran parte de ella, la red eléctrica nacional es prácticamente inexistente como se puede observar el siguiente mapa. [10]



Figura 1.11 Sistema Interconectado Nacional. [11]

La geotermia resulta ser una alternativa para la solución de este problema, la experiencia que se tiene en el mundo es que el desarrollo geotérmico resulta exitoso cuando se lleva a cabo en regiones que disponen del recurso y donde se tienen demandas pequeñas de energía eléctrica, núcleos reducidos de población, dificultades de acceso para las redes de interconexión y cierto aislamiento con otros sitios de consumo energético. Países como Kenia, Filipinas y El Salvador, basan su producción de electricidad en la geotermia y en México se tiene el caso de Mexicali, la cual es en mayor parte abastecida por la Central de Cerro Prieto. [10]

CAPÍTULO 2

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, el objetivo de este trabajo es estudiar el fenómeno de la evaporación instantánea en un ciclo geotérmico de generación eléctrica, en el cual se aprovechan los recursos geotérmicos de baja entalpía. La finalidad de este capítulo es describir este fenómeno, sus características, casos de estudio y su aplicación en la geotermia, así como los distintos dispositivos utilizados para lograr la evaporación instantánea de manera óptima.

2. EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA



2. EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA

Para poder estudiar el comportamiento de un fluido en condiciones de saturación al pasar por un dispositivo de estrangulamiento, es importante primero comprender el fenómeno de la evaporación instantánea. Se trata de un fenómeno que tiene múltiples aplicaciones en muchas áreas de la industria, sin embargo la literatura existente es escasa ya que su análisis resulta en gran medida complejo, es por ello que en la mayoría de los casos se utiliza un método empírico para lograrlo eficientemente. De aquí parte la necesidad de estudiar dicho fenómeno con mayor detenimiento.

2.1 Definición

La rápida evaporación de un fluido durante una despresurización es un fenómeno que ocurre con frecuencia en la industria, se sabe que la presión y temperatura iniciales son los principales factores que influyen en el cambio de fase. Este fenómeno incluye procesos de transferencia de masa y calor, es ampliamente utilizado en la industria aeroespacial, refrigeración, desalación, industria química y otras aéreas.

Existen dos maneras de lograr la rápida evaporación, la primera es calentar el fluido rápidamente mientras la presión es mantenida y la segunda es llevar el fluido a alta presión y temperatura, y después despresurizarlo rápidamente. La energía total suministrada al fluido no puede contenerse como calor sensible y el exceso de energía es convertido en calor latente, llevando al fluido a un intenso cambio de fase, de líquido a vapor.

A pesar de que este fenómeno tiene múltiples ventajas en la industria, también tiene severos inconvenientes en algunos procesos, tal es el caso del sistema de enfriamiento de un reactor nuclear, donde este fenómeno es la principal fuente de accidentes. Otro caso bien fundamentado es el de la explosión de las paredes de las tuberías de una caldera, esto ocurre cuando se despresuriza rápidamente al fluido de trabajo.

En recientes años se han realizado algunos estudios acerca de evaporación instantánea debida a la despresurización, sin embargo estos textos son escasos y en la mayoría de ellos se ha optado por utilizar un método de prueba totalmente experimental para investigar sobre el comportamiento termodinámico de un fluido durante el proceso de repentina caída de presión. [12]



Figura 2.1 Dispositivo para destilación de leche mediante evaporación instantánea. [13]

2.2 Características

La mayoría de los investigadores que han establecido modelos que caracterizan el cambio de fase repentino de un fluido, lo han hecho a partir de datos experimentales. A continuación se enlistan las principales características de este fenómeno:

- Durante el proceso de la rápida despresurización, los valores de presión y temperatura inicial afectan principalmente la transición de la temperatura del fluido. Además la caída de la temperatura es mayor para un alto valor de temperatura inicial.
- Si la caída de presión es grande y ocurre súbitamente, aumenta la intensidad del cambio de fase, la rápida despresurización es la clave de la evaporación instantánea.
- El valor final de la masa evaporada aumenta mientras mayor sea la caída de presión, pero si la temperatura inicial del fluido es alta respecto a la presión de saturación, el vapor obtenido contiene poca energía.

A un nivel local, existe una serie de variaciones de la temperatura del fluido en el transcurso de la evaporación. Antes de que se despresurice el fluido, este se encuentra en un estado de saturación, es decir, las primeras gotas de vapor se habrán formado. Al estar las burbujas en equilibrio termodinámico, la temperatura del líquido que las rodea debe ser igual a la del vapor que está contenido dentro de ellas. Por otra parte, la temperatura del vapor es igual a la de saturación a la presión de vapor correspondiente.

Debido a que la presión del líquido es menor que la del vapor, se puede decir que el líquido que rodea las burbujas de vapor se encuentra en un estado de equilibrio metaestable, es decir, un punto intermedio entre la estabilidad y la inestabilidad. A pesar



de que el fluido caliente parece estar inalterable, está al borde de sufrir inestabilidad, sin embargo le cuesta trabajo cambiar de estado; de tal modo que si se le perturba demasiado, cambiará a un estado de menor energía. Esta perturbación es la despresurización súbita y el exceso de energía del líquido, en forma de calor latente, servirá para hacer crecer las burbujas y permitirá la evaporación de más líquido que evidentemente dependerá del radio máximo de las burbujas. [14]

2.3 Caso de estudio

En Julio del año 2012, cinco investigadores chinos realizaron una investigación experimental acerca de la rápida evaporación de un fluido elevado a altas presiones, después de una repentina despresurización. [12]

Se seleccionó refrigerante R113 como fluido de trabajo por sus múltiples ventajas en comparación con el agua, tales como su bajo punto crítico, sus bien conocidas propiedades termodinámicas, condiciones de operación más seguras ya que se trabaja con temperaturas y presiones discretas.

El equipo experimental que se utilizó fue el siguiente:

- 1.- manómetro.
- 2.- bote de nitrógeno.
- 3.- regulador de gas.
- 4.- cámara digital.
- 5.- iluminador.
- 6.- recipiente de prueba
- 7.- válvula.
- 8.- termopares.
- 9.- transductor de presión.
- 10.- tarjeta de adquisición de datos.
- 11.- computadora

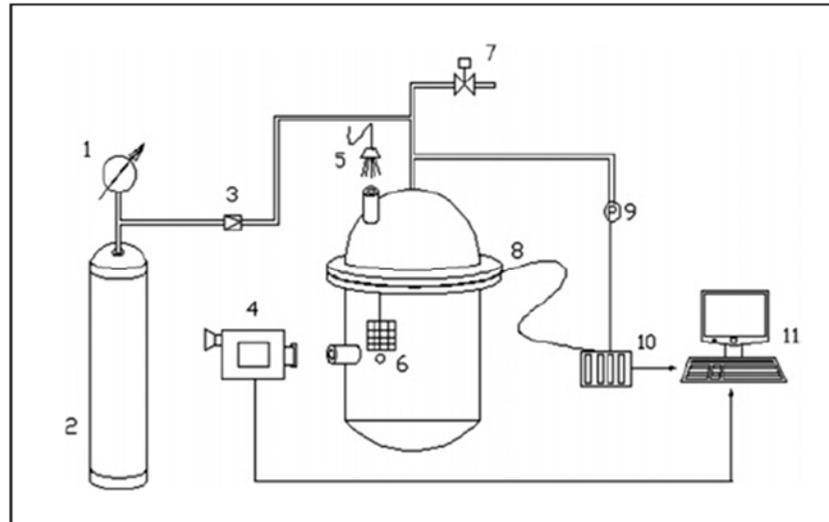


Figura 2.2 Diagrama del equipo experimental.

El recipiente de prueba está manufacturado de acero inoxidable, soporta presiones de hasta 6 MPa, está conectado a la válvula y tiene dos ventanas; una en la parte superior que es para la iluminación y otra en un lado, es para la visualización del fenómeno. Hay dos termopares dentro del recipiente, en el contenedor del fluido de trabajo, el primero se encuentra en la superficie, el otro se localiza en algún punto del líquido para comparar los valores medidos con el otro termopar. La presión predeterminada es proporcionada por el bote de gas nitrógeno. La evolución de la rápida evaporación fue observada por la cámara digital y todos los valores medidos fueron procesados por la tarjeta de adquisición y por la computadora.

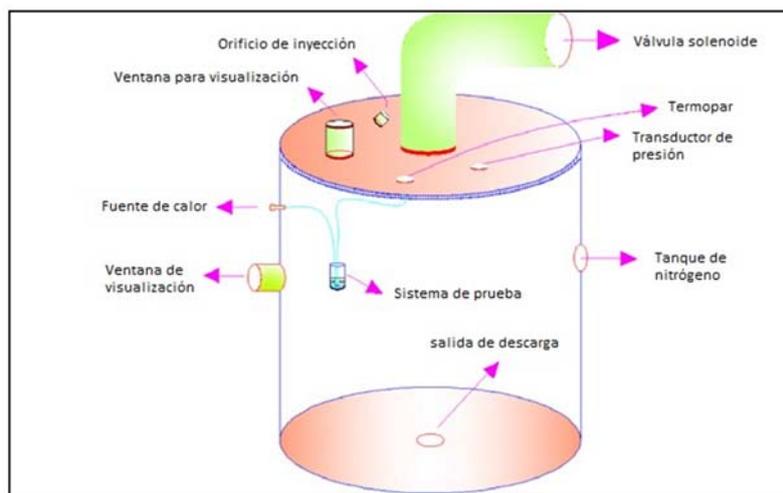


Figura 2.3 Descripción del recipiente de prueba.

Se ajustó la iluminación y se colocó refrigerante R113 en el tubo de vidrio dentro del recipiente de prueba, luego se encendió el sistema de adquisición de datos y entonces la cámara comenzó a grabar. Después se desactivó la válvula solenoidal para

posteriormente aumentar la presión dentro del recipiente con ayuda del regulador de gas, hasta que se alcanzó el valor determinado de presión. Después el líquido fue calentado hasta el valor de temperatura deseado y finalmente la válvula se accionó para permitir el acceso de la presión atmosférica y así lograr la repentina despresurización. El fenómeno de evaporación instantánea dio lugar durante la caída de presión.

Se definieron los valores de presión y temperatura durante el proceso de despresurización rápida. Se realizaron 4 eventos con condiciones iniciales distintas:

	Presión [MPa]	Temperatura [°C]
1	2.98	14
2	2.07	14
3	1.03	14
4	1.03	43

Tabla 2.1 Valores iniciales de presión y temperatura.

La temperatura del recipiente de prueba se mantuvo para evitar los efectos del ambiente, de igual forma los dos termopares estuvieron a la misma temperatura antes de entrar en contacto con el refrigerante.

La siguiente gráfica que ellos obtuvieron muestra la clara importancia que tiene la presión inicial del fluido sobre para la reducción de temperatura.

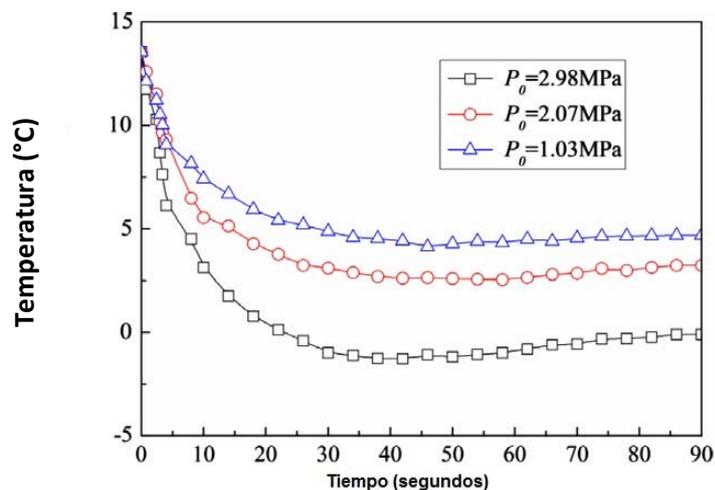


Figura 2.4 Influencia de la presión inicial sobre la transición de temperatura.

Para calcular la masa final evaporada durante la rápida evaporación, de acuerdo a la visualización de las fotos tomadas por la cámara, la correlación utilizada fue la siguiente:

$$m_{ev} = \rho_t \Delta V$$

Donde ΔV es el decremento del volumen del líquido y fue medido con las imágenes obtenidas.

A continuación se muestran las gráficas que corresponden a la evolución de la masa final evaporada con respecto a diferentes presiones y temperaturas iniciales.

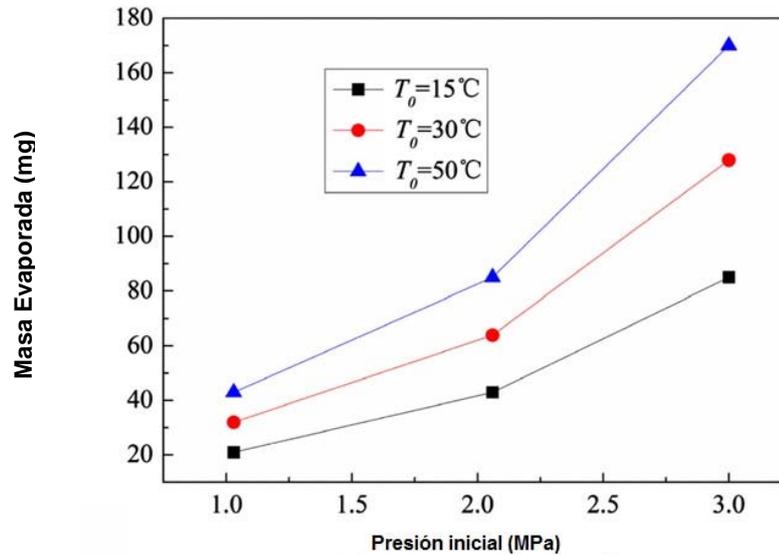


Figura 2.5 Masa evaporada respecto a presión inicial.

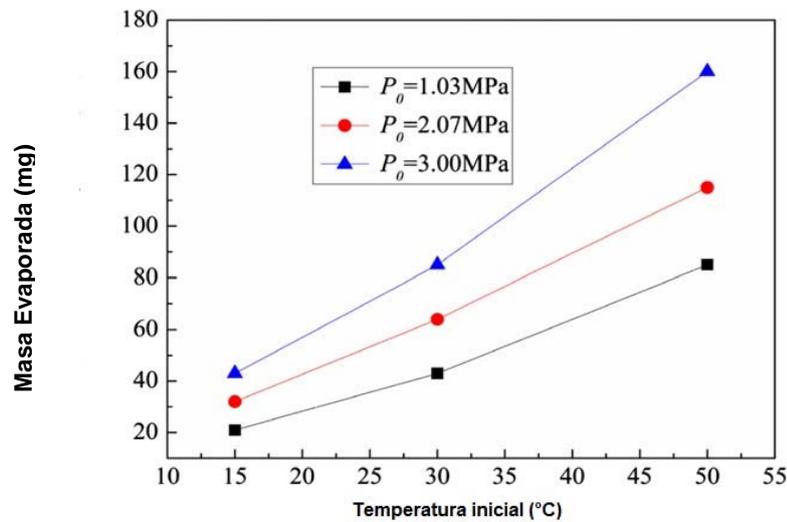


Figura 2.6 Masa evaporada respecto a temperatura inicial.

Este experimento resulta de gran utilidad para el tema original de estudio, si bien en este caso el fluido se encontraba estático, aun así fue de suma importancia ya que caracteriza el fenómeno de la rápida evaporación y nos permitió conocer las principales características del fenómeno y el comportamiento del fluido durante el intenso cambio de fase.

2.4 Evaporación instantánea en la geotermia

2.4.1 Ciclos de una y dos evaporaciones instantáneas

Cuando los campos geotérmicos producen una mezcla de vapor y líquido, es posible extraer una importante cantidad de energía adicional de la fase líquida. Esto se puede lograr mediante el fenómeno de la evaporación instantánea, se hace pasar el fluido bifásico a través de un dispositivo de estrangulamiento, como una placa de orificio o una válvula de compuerta, a esta técnica se le conoce en la industria como “*flasheo*”. El fluido es despresurizado drásticamente y como consecuencia parte de él se evapora. Se separan las dos fases con un separador de flujos, el vapor se manda a la turbina y posteriormente puede ser condensado y reinyectado o descargado directamente a la atmósfera.

Si no se consideraran las pérdidas térmicas y otros factores, este proceso se podría realizar un gran número de veces, utilizando un número infinito de dispositivos de estrangulamiento y separadores, conectados en cascada; sin embargo resultaría absurdo económicamente hablando. Por lo tanto, en algunas ocasiones es rentable realizar dos procesos de evaporación instantánea, cuidando que la temperatura en el primer *flasheo* sea igual a un tercio de la diferencia entre la temperatura del fluido recolectado a la salida del pozo y la temperatura del condensador; y que la del segundo *flasheo* sea aproximadamente a dos tercios de dicho intervalo. El vapor obtenido del segundo *flasheo* puede ser utilizado en las etapas de menor presión de la turbina. [4]

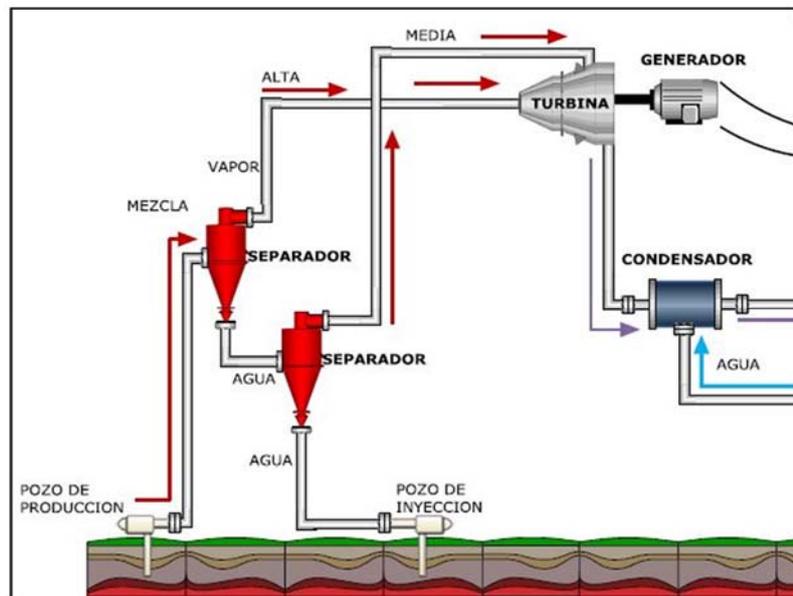


Figura 2.7 Ciclo de doble evaporación instantánea.

El proceso de evaporación instantánea se puede modelar como uno a entalpía constante, ya que ocurre espontánea, continua y adiabáticamente, además no existe trabajo involucrado. De igual forma, se puede despreciar cualquier cambio en la energía cinética y potencial del fluido, mientras es sometido al proceso de estrangulamiento. La siguiente figura muestra el diagrama de un ciclo de una evaporación instantánea, la secuencia de los estados termodinámicos inicia con el fluido geotérmico a la salida del pozo, en condiciones cercanas a la saturación. [8]

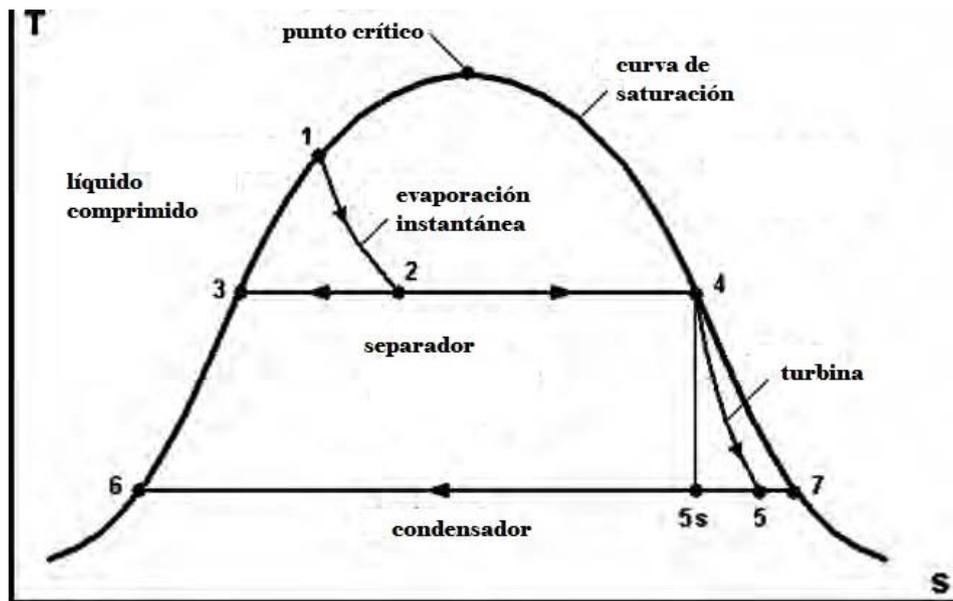


Figura 2.8 Diagrama temperatura-entropía de un ciclo con una evaporación instantánea. [8]

2.4.2 Destilación instantánea de múltiple etapa

Este proceso también es conocido como MSF por sus siglas en inglés *Multistage Flash Evaporation*, es uno de los procesos de destilación más utilizados en el mundo ya que es muy adecuado para aguas con alta salinidad y contaminación. El método se basa en el fenómeno de la evaporación instantánea, se introduce agua de mar precalentada a temperatura de saturación, dentro de una cámara *flash* donde se genera una caída de presión suficiente para que parte del líquido se evapore abruptamente. Para aumentar la cantidad de vapor se repite el proceso sucesivamente en varias etapas, reduciendo continuamente la presión de cada una de ellas, ya que la temperatura también disminuye. [15]

El vapor producido pasa a través de filtros donde se le retiran las gotas de salmuera que arrastra. Finalmente el vapor es condensado, cediéndole energía al agua de mar que alimenta la planta, se colecta en un tanque y se le extrae como producto final. Si la transferencia de calor se llevara a cabo en ausencia de pérdidas, una vez empezado el ciclo no habría que suministrar una cantidad adicional de energía; sin

embargo esto no sucede y en consecuencia se tiene que disponer de una fuente externa que alimente la planta, esta puede ser los recursos geotérmicos de baja entalpia. [16]

La salmuera que no se evaporó es desechada. El agua de mar precalentada tiene una temperatura entre 90 y 120 °C. Mientras mayor sea esta temperatura, la eficiencia del sistema aumenta.

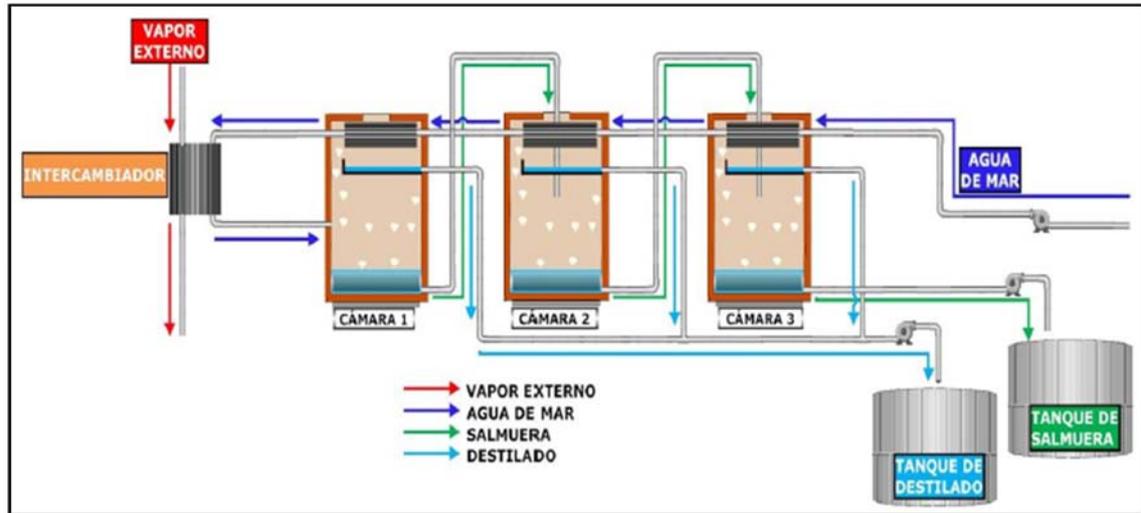


Figura 2.9 Diagrama de un sistema MSF de 3 etapas. [16]

2.5 Dispositivos empleados para la evaporación instantánea en la geotermia

2.5.1 Placa de orificio

Si bien el comportamiento termodinámico de la placa orificio como medidor de flujo está totalmente caracterizado en la literatura; no es el caso en el que se utiliza como instrumento de evaporación instantánea, donde el respaldo teórico es prácticamente nulo y requiere de un análisis complejo.

Como instrumento de evaporación rápida se le ha dado reciente uso a la placa orificio en la geotermia, donde en las centrales geotermoeléctricas se utiliza este dispositivo para darle una mayor calidad de vapor al fluido de trabajo y así lograr extraer una cantidad adicional de energía. A pesar de que se logra hacer este proceso, prácticamente se tiene que realizar un método de prueba y error para cada caso, lo que conlleva a tener poca exactitud al hacerlo. Otro uso que se le da a la placa de orificio en la geotermia es como el de la central de Los Azufres, donde se usa para regular la presión después del pozo, esto debido a que cada uno tiene propiedades y condiciones diferentes y de ahí la necesidad de homogenizar las condiciones de presión y temperatura de todos ellos, para posteriormente coleccionar y transportar el vapor hacia las turbinas.

El método que utilizan también es totalmente empírico, es decir, prueba y error. Los técnicos tienen en sus talleres una amplia gama de placas con diferentes orificios, estas placas las instalan a la salida del pozo y miden la presión después de ellas, si el valor de presión es el deseado dejan instalada la placa y sino, utilizan otra con diferente orificio y así hasta tener la presión que se solicite. Estas placas las manufacturan ahí mismo, al no ser utilizadas como medidores de flujo, no necesitan ningún tipo de acabado, como algún bisel o chaflán y tampoco alguno superficial.



Figura 2.10 Grupo de placas orificio utilizadas en la central geotermoeléctrica Los Azufres.



Figura 2.11 Placas orificio instaladas en boca de pozo.

En otra sección del proceso de producción de vapor, la placa orificio es utilizada como medidor de flujo de vapor, se instalan después del separador de flujos, antes de que el vapor sea enviado a la turbina. Debido al uso que se le da a las placas orificio en esta sección, deben ser manufacturadas bajo específicas normas y estándares, como se puede observar en la siguiente imagen, la placa orificio lleva un bisel y un chaflán de 45° en la dirección del flujo, por otra parte se aprecia el acabado superficial fino, para evitar pérdidas por fricción y tener lecturas confiables.



Figura 2.12 Placa orificio para medir flujo de vapor.

Se ha seleccionado este instrumento para la rápida evaporación ya que se tienen pérdidas considerables de presión, las cuales, sumado a las condiciones de temperatura y presión con las que entra el fluido a la placa, hace que se logre eficientemente el fenómeno. [17]

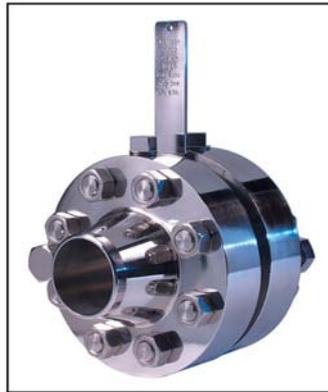


Figura 2.13 Placa orificio con bridas cónicas

2.5.1.1 Medición de flujo con placa orificio

En todas las áreas de la ingeniería, la medición del flujo es una de las variables más importantes en la operación de cualquier planta ya que sin esta medición no se podría llevar a cabo el balance de materia, control de calidad y la operación misma de los diferentes procesos serían casi imposibles de realizar.

Entre los instrumentos de medición, el que tiene mayores ventajas es la placa de orificio ya que tiene bajo costo, es de fácil aplicación e instalación, además de que se pueden tomar mediciones precisas, continuas y en tiempo real. Este dispositivo funciona a partir del principio de Bernoulli donde la propiedad con la que posteriormente se puede obtener el valor del flujo másico, es la caída de presión y existe una ecuación bien definida para hacerlo.

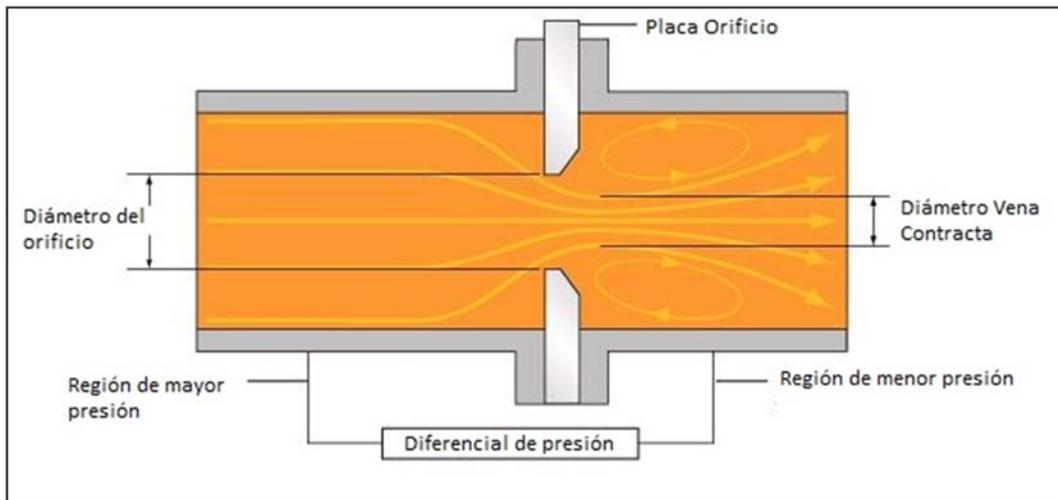


Figura 2.14 Principio de operación placa orificio. [18]

Para instalar la placa orificio en tubería, se utilizan bridas que pueden ser roscadas o cónicas para soldar. La placa orificio es una lámina circular y plana, el orificio puede ser concéntrico, excéntrico o segmentado y en algunas ocasiones, cuando se mide el flujo de gases, se le hace un orificio pequeño en la parte inferior para permitir paso del condensado. La placa orificio tiene un diámetro exterior igual al espacio interior que existe entre los tornillos de las bridas de montaje. El espesor de la lámina depende del diámetro de la tubería y de la temperatura del fluido, también se le hace un biselado afilado al orificio, con un chaflán de ángulo de 45° con dirección a la región de menor presión. Además, en la parte superior, la placa orificio lleva una sección conocida como "oreja", en donde se marca el número de serie, la entrada, la capacidad y distancia para medir la presión aguas arriba y abajo.

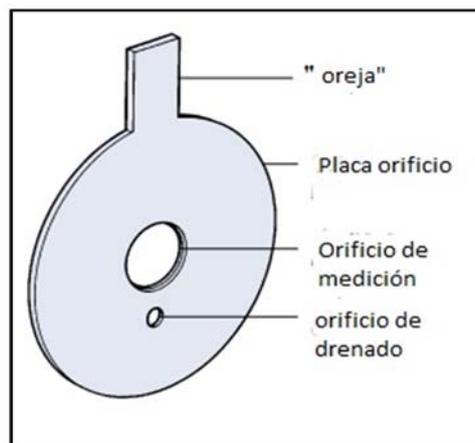


Figura 2.15 Elementos de placa orificio. [18]



2.5.1.2 Materiales de fabricación

Debido a que las condiciones de flujo generalmente no son tan exigentes, el material utilizado para su construcción es acero inoxidable del tipo 304 y 316.

El acero inoxidable 304 es uno de los más utilizados en la industria, tiene excelentes propiedades para el conformado y el soldado. La resistencia a la corrosión que tiene es excelente, incluyendo productos de petróleo calientes o gases productos de combustiones. Puede trabajar bajo temperaturas de hasta 860 °C y tiene una resistencia a la fluencia de 310 MPa.

El acero 316 es ampliamente disponible, tiene buena resistencia a la corrosión en general, buena dureza, maleabilidad y soldabilidad. Debido a que su composición incluye de 2 a 3 % de molibdeno, previene la aparición de agentes corrosivos y mejora considerablemente su resistencia a la misma. También se le conoce a este acero como "acero grado marino" ya que su resistencia a la corrosión en cloruro es mayor que la del tipo 304, por lo que se ha convertido en un material ampliamente utilizado en ambientes cercanos al mar. Este tipo de aceros es utilizado comúnmente en: condensadores, intercambiadores de calor, filtros, válvulas, bridas y conexiones.

Como se puede observar, cualquiera de estos dos aceros puede ser utilizado para fabricar placas orificio, ya que las presiones y temperaturas con las que se trabaja están muy por debajo de las capacidades de los materiales antes mencionados.

2.5.1.3 Medición de flujo bifásico

Existe un caso especial en el que se utiliza a la placa para cuantificar el gasto volumétrico pero en un fluido que se encuentra en dos fases, líquida y vapor. Algunos autores han realizado diversos experimentos y con los resultados han establecido correlaciones para cuantificar el flujo bifásico con el que se trabaja.

Las correlaciones hechas para flujos de dos fases se realizan a partir del modelo original y para hacer las debidas correcciones se le multiplica por un coeficiente K, que es el que nos indica que se está trabajando con un flujo bifásico. A continuación se describen los trabajos realizados por algunos autores.

Murduck. Para su correlación Murduck utilizó un modelo de separación de flujo, asumiendo que originalmente las dos fases del flujo atraviesan de manera independiente la placa de orificio. De esta forma calculó el coeficiente de descarga y de compresibilidad para cada fase y junto con la fracción de sequedad del fluido, obtuvo un coeficiente de corrección.

James. Desarrolló una correlación a partir de asumir un modelo del flujo homogéneo, en el cual ambas fases del flujo viajan a través de la tubería en equilibrio termodinámico y a igual velocidad. Resultado de este modelo es suponer que el flujo



tiene una densidad homogénea y de esta forma poder calcular el flujo másico a través del orificio. James tomó mediciones con un amplio rango de fracciones de sequedad. De esta manera obtuvo el coeficiente de corrección.

Lin. También utilizó un modelo de separación de flujo con la diferencia que al mismo tiempo asumió el mismo coeficiente de descarga y compresibilidad para ambas fases. Lin utilizó refrigerante R111 como fluido de trabajo y con las mediciones correspondientes obtuvo el coeficiente de corrección.

Zhang. Estableció una correlación especialmente para flujos con baja calidad de vapor, en un rango de 0.007% a 1%. Tal como lo hizo James, Zhang también asumió un modelo de flujo homogéneo con la diferencia que él encontró la fracción de sequedad adecuada para que el modelo fuera más preciso. Calculó un factor de compresibilidad para el fluido en ambas fases y con ello y las mediciones tomadas, encontró el factor de corrección y lo añadió a la ecuación original. [17]

2.5.2 Válvulas

Las válvulas son *“dispositivos con características móviles que permiten abrir y cerrar una vía de circulación con el fin de permitir, prevenir o controlar el flujo de fluidos”*¹. Estos elementos también se utilizan en las centrales geotermoeléctricas para la evaporación instantánea, ya que a pesar de considerarse dispositivos que generan pérdidas menores o localizadas, cuando están parcialmente cerradas pueden llegar a producir mayor caída de presión que un tramo muy largo de tubería. Al igual que en el caso de la placa orificio, la configuración del flujo en estos dispositivos es compleja y la teoría existente es muy pobre. Generalmente las pérdidas que generan cada tipo de válvulas se obtienen experimentalmente y se correlacionan con las condiciones de flujo. La información técnica de cada tipo de válvula, depende del diseño y manufactura del fabricante, es por eso que los datos encontrados en libros de texto solo son estimaciones promedio entre valores de distintos fabricantes. [19]

Debido a que las válvulas no fueron diseñadas para realizar la evaporación instantánea sufren daños en el interior, provocados por la formación de burbujas de vapor, que al colapsarse generan cavitación.

Existe una gran variedad de diseños de válvulas, las que son más utilizadas en la evaporación *flash* son las de compuerta y mariposa, a continuación se describen cada una de ellas, sus características, diseño y materiales de fabricación.

¹ Japanese Industrial Standards

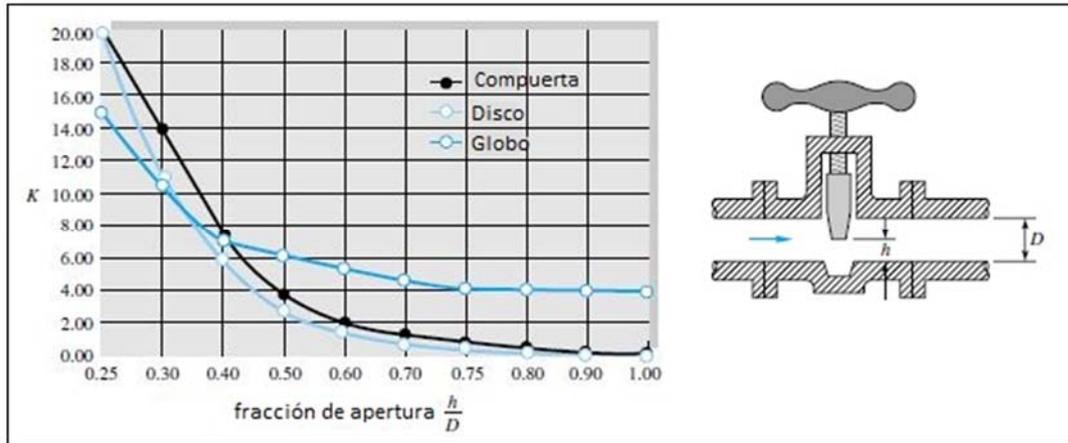


Figura 2.16 Coeficientes de pérdidas promedio, para válvulas abiertas parcialmente. [19]

2.5.2.1 Válvula de compuerta

Esta tipo de válvula consta de un disco o compuerta circular, con un vástago que al ser accionado manualmente se desliza hacia abajo y obstruye la sección transversal de la tubería. Cuando la válvula está totalmente abierta, la compuerta se eleva por completo, fuera del conducto del flujo, por lo tanto el fluido pasa libremente por una sección que tiene el mismo diámetro de la tubería.

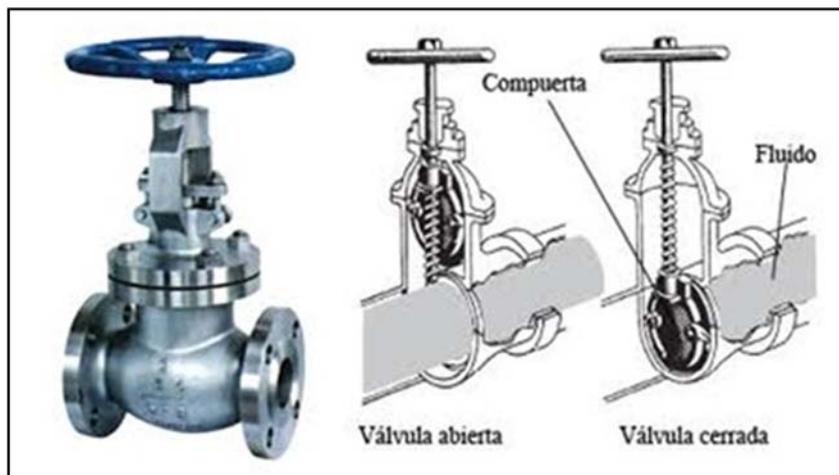


Figura 2.17 Operación válvula de compuerta.

Generalmente, las válvulas de compuerta se manufacturan de bronce, hierro dúctil, acero fundido, forjado y acero inoxidable. Se utilizan eficientemente en aplicaciones como compresoras, condensadores de vapor, líneas de vapor y agua, en industria química, marina, petrolera, de generación de electricidad. En refinerías, plantas catalíticas, servicio de hidrocarburos, líneas de gas, y en la industria en general; aunque también las hay de uso doméstico.

Se recomienda utilizar este tipo de válvulas cuando se requiere interrumpir o cortar el paso de un fluido en una línea, es decir, no deben ser utilizadas para regular el

flujo ya que la velocidad del mismo, al atravesar la válvula que se encuentra parcialmente abierta, ocasiona un desgaste excesivo en la compuerta, por lo tanto debería permanecer totalmente abierta o cerrada. Sin embargo, en las centrales geotermoeléctricas se utilizan parcialmente cerradas para lograr la evaporación instantánea, es por ello que la vida útil de estos dispositivos se reduce considerablemente. [20]

2.5.2.2 Válvula de mariposa

Este tipo de válvula es diseñado para utilizarse como dispositivos de bloqueo total o para regulación de flujos. Son ligeras y compactas, además de su funcionamiento simple. Consta de un disco interno que gira 90° para abrir o cerrar totalmente. La válvula de mariposa es más versátil que la de compuerta, ya que se puede utilizar en más procesos industriales y químicos.



Figura 2.18 Válvula de mariposa.

Las válvulas de este tipo se fabrican principalmente de hierro y bronce. En la geotermia se utilizan regulando la apertura del disco, de esta forma se puede manipular la caída de presión y por consecuencia lograr eficientemente la evaporación instantánea. En el presente trabajo se tuvo la intención de analizar experimentalmente el uso de la válvula de mariposa como instrumento de evaporación instantánea, sin embargo comercialmente no existen para diámetro de media pulgada, el cual es el que se requiere en el Ciclo Binario de Evaporación Instantánea.

CAPÍTULO 3

Para que los resultados finales sean los esperados, es necesario hacer uso del método científico y de un diseño de experimentación óptimo, ya que no es posible analizar solo teóricamente el problema, es necesario recurrir a mediciones y experimentación que comprueben la hipótesis planteada. Este capítulo explica detalladamente la metodología experimental que se utilizó para analizar la evaporación instantánea, así como una pequeña descripción del método científico, sus limitaciones y virtudes.

3. METODOLOGÍA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL



3. METODOLOGÍA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL

La supervivencia del hombre y su evolución están estrechamente relacionadas con la ciencia desde sus orígenes, ya que el hombre se ha esforzado para satisfacer sus necesidades materiales e intelectuales, así como mejorar sus condiciones de vida e incrementar su conocimiento, con el objetivo de comprender la naturaleza del medio del cual forma parte.

Lo que hoy conocemos como ciencia es una sucesión evolutiva de una serie de conceptos que tuvieron sus orígenes hace más de dos mil años con los griegos. La diferencia con esa época y la actual, fue que los eruditos de esos tiempos no fueron capaces de visualizar la cercana relación entre teoría y experimento, la cual es la característica más importante de la ciencia moderna. Esta característica dio origen a un método que pudiera dar respuesta a los problemas que son planteados por los científicos, el cual se le conoce como método científico.

La experimentación, es el común denominador entre diferentes áreas como la física, ingeniería, biología o incluso la filosofía. En todas estas áreas surge la necesidad de dar solución, y en algunos casos respuesta a distintos problemas, a pesar de esto, en todas ellas se realizan experimentos. Independientemente del tipo de investigación que se trate, la experimentación tiene un papel trascendental, ya que para que un conocimiento se considere válido no es suficiente con haberlo determinado o demostrado por medio de metodología racional, sino que complementariamente necesita la comprobación directa mediante la experimentación. [21]

En el presente capítulo se describirá detalladamente la metodología empleada para realizar el análisis teórico del fenómeno de evaporación instantánea; así como, para la experimentación, proceso de medición, instalación de equipos e instalación del sistema experimental de generación de vapor.

3.1 El método científico

Hoy en día el hombre se enfrenta a grandes retos en su afán de descubrir los secretos de la naturaleza y por la necesidad de diseñar dispositivos que le permitan vivir mejor. Una herramienta muy útil que el investigador utiliza para dar solución a dichos problemas es el método científico.

El método científico es el resultado de investigaciones que resultaron exitosas y gracias a que los científicos e ingenieros registraron la forma con que lograron resultados positivos, fue que otros después de ellos, analizaron sus procedimientos y comprobaron su efectividad. De tal forma que tales procesos, se transformaron en un método verdaderamente científico.



El uso de este método causa confusión, ya que algunas personas lo consideraron como un método en el sentido de un procedimiento formal, es decir, tal como una receta infalible para hacer descubrimientos. Utilizar el método científico no es garantía de éxito, solo proporciona una orientación para encontrar soluciones acertadas a los problemas planteados por la sociedad.

El método científico es un proceso que se lleva a cabo a través del tiempo y que comprende una serie de etapas que deben realizarse sucesivamente, ya que cada una requiere de la anterior. Dichas etapas son las siguientes:

- 1) Planteamiento del problema.
- 2) Formulación de la hipótesis.
- 3) Comprobación de la hipótesis.
- 4) Construcción de leyes, teorías y modelos.

Como puede observarse, en el presente trabajo se utilizó el método científico, el planteamiento del problema es el objetivo general y las otras etapas del método se explicaran a detalle en los siguientes capítulos. Cabe mencionar la importancia que tiene el uso en conjunto, de procedimientos racionales y empíricos para que se dé satisfactoriamente el proceso del método científico.

3.1.1 Enfoque de investigación cuantitativo y cualitativo

“La investigación es un conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno”.² Existen dos rutas principales en la búsqueda de conocimiento, estas son, los enfoques cuantitativo y cualitativo. Estos dos enfoques son el resultado de la polarización de diversas corrientes de pensamiento como el empirismo, el materialismo dialéctico, el positivismo, la fenomenología y el estructuralismo, entre otras.

El enfoque cuantitativo es secuencial y demostrativo. Cada fase antecede a la siguiente y no se puede alterar el orden de sus etapas. Se parte de una idea, de la cual se plantea un caso de estudio delimitado y concreto. Se realiza un estado del arte, revisando la literatura y construyendo un marco teórico. Se establecen hipótesis, se determinan las variables a medir y se desarrolla un plan para hacerlo. Al final se establece una serie de conclusiones respecto a las hipótesis hechas.

Una investigación del tipo cuantitativa nos proporciona la posibilidad de generalizar resultados considerablemente, ofrece control sobre los fenómenos, así como un punto de vista de conteo y las magnitudes de los mismos. De igual forma, nos otorga una gran posibilidad de repetitividad al realizar el muestreo y un planteamiento sobre

² Metodología de la investigación. Roberto Hernández Samperi, Carlos Fernández Collado, Pillar Baptista Lucio.



puntos específicos de dichos fenómenos, por otra parte, facilita la comparación con otros estudios similares.

En el enfoque cualitativo también existen fases o etapas del proceso, sin embargo el orden es más libre, la secuencia varía según el caso en específico, por ejemplo; en los estudios cualitativos se pueden plantear o desarrollar hipótesis en cualquier etapa del proceso. Por otra parte, al inicio de la investigación se hace una revisión general de la literatura, esta puede complementarse en cualquier etapa de proceso y aportar a las demás fases. Otra característica del enfoque cualitativo, es que con frecuencia es necesario retroceder a etapas previas del proceso, algunas veces se tiene que rediseñar el estudio de la muestra o prueba, ya que en algunas ocasiones no es factible por alguna razón, realizar observaciones deseadas. La investigación cualitativa proporciona profundidad a los datos, dispersión, riqueza, contextualización con el exterior o entorno, detalles y experiencias específicas.

En conclusión, ambos enfoques son valiosos y han tenido grandes aportaciones al avance del conocimiento. Uno no se puede considerar mejor que el otro, solo establecen diferentes orientaciones al estudio de un fenómeno.

En la presente investigación se puede afirmar que ambos enfoques son de gran utilidad, es decir, se tiene un enfoque mixto. Es cierto que se siguió un proceso secuencial y progresivo al realizar paso a paso las etapas, por otra parte, en alguna de ellas se realizó investigación bibliográfica con el fin de complementar a las demás fases. También se tuvo que rediseñar la metodología de experimentación por diferentes circunstancias, esto permitió la evolución del sistema de generación de vapor, hasta llegar a un modelo final. [22]

3.2 Experimentación

*“El experimento es la experiencia científica en que se provoca deliberadamente algún cambio y se observa e interpreta su resultado con alguna finalidad cognoscitiva.”*³ En un experimento el desarrollo de los procesos ocurre bajo condiciones totalmente planeadas y controladas; sin embargo, si se varían las condiciones es posible observar diferentes efectos y de esta forma obtener una visión más amplia del comportamiento del fenómeno estudiado. Por otra parte, el control de las condiciones consiste sencillamente en que el investigador sea capaz de hacer que se manifiesten y que se mantengan durante el tiempo que dure el experimento y así, realizar la observación y medición de las variables.

³ Introducción a la metodología experimental. Carlos Gutiérrez Aranzeta.



Dentro de los experimentos también se puede aplicar los enfoques cuantitativo y cualitativo, de tal suerte que en uno cuantitativo, el control se realiza bajo mediciones precisas y en uno cualitativo, el control no se lleva a cabo con precisión.

Evidentemente un experimento cuantitativo es más complejo que uno cualitativo, pero no necesariamente más útil desde el punto de vista intelectual. Esto depende de los resultados que se espere obtener de cada fenómeno, por ejemplo, en un experimento cuantitativo se supone que el personal ya tiene bien desarrolladas las técnicas de medición y el uso de los instrumentos, es decir, resulta a veces innecesario la cuantificación precisa de variables si no se puede realizar una buena interpretación de los resultados.

Generalmente los enfoques experimentales difieren, pero tienen algo en común, están sometidos a un patrón secuencial de planeación, implementación y evaluación. Es decir, al igual que en una investigación analítica y teórica, en la experimentación también existe un método que funciona como una guía, para la formulación y solución de problemas. Este método se denomina como método experimental y sus fases principales son las siguientes:

- Observación.
- Reflexión de la hipótesis.
- Predicción de las consecuencias.
- Planeación del experimento para someter la hipótesis a prueba.
- Diseño del experimento.
- Ejecución del experimento.
- Obtención de resultados.
- Comparación entre datos experimentales y predicciones teóricas.
- Conclusiones.

Es importante señalar que debe someterse a reflexión, la necesidad de realizar un experimento ya que de ser precipitada la decisión, solo se desperdiciaría una gran cantidad de dinero, tiempo y esfuerzo, solo para descubrir que el experimento fue innecesario.

Durante la etapa de planificación el investigador deberá realizar cuidadosamente un análisis, para seleccionar las técnicas e instrumentos de medición necesarios y que sean los más adecuados según el presupuesto con el que se cuente.



3.3 Medición

*“Medición es el proceso por el cual se le asigna un número a una propiedad física de algún objeto o fenómeno con propósito de comparación”.*⁴ La medición es algo tan común que lo hacemos diario en nuestras vidas sin tener conciencia de ello, ya que medimos con la necesidad de comparar y comparar es algo que forma parte de la naturaleza del hombre.

Tecnológica y científicamente, medir es una operación en la que necesariamente intervienen cuatro sistemas:

- 1) Objeto a medir.
- 2) Instrumento de medición.
- 3) Sistema de comparación (unidad).
- 4) Operador.

Con cada proceso de medición se obtiene algo que se le denomina magnitud física, sin embargo, ningún instrumento es capaz de medir directamente dicha magnitud, sino medir su efecto sobre el instrumento. Además, existen muchos procesos para medir una misma magnitud, por ejemplo; no es lo mismo medir distancias interatómicas a distancias interplanetarias.

En todo proceso de medición, el instrumento perturba en mayor o menor medida el sistema que se está midiendo. La instrumentación moderna pretende disminuir lo más posible dichas perturbaciones. A esas perturbaciones también se les asigna un valor numérico y es una medida del error que se obtiene al utilizar determinado instrumento.

En el presente trabajo se midieron básicamente tres variables; presión, temperatura y flujo. Las primeras dos se midieron, primero con instrumentación analógica y luego con digital, se observaron notables cambios de una manera respecto de la otra. Para medir el flujo se utilizó un método básico, el cual consiste en depositar cierta cantidad de líquido en un recipiente y medir el tiempo que tardó en ocuparlo, así como el volumen de dicha cantidad.

3.4 Análisis del Ciclo Binario de Evaporación Instantánea

Como se mencionó en el primer capítulo, el Ciclo Binario de Evaporación Instantánea tiene la cualidad de que el sistema por medio del cual se genera vapor, está constituido por tres elementos: Intercambiador de placas, dispositivo de estrangulamiento y separador de flujos. En el intercambiador se le transfiere energía al fluido de trabajo para llevarlo a condiciones de saturación y luego se despresuriza drásticamente con el dispositivo de estrangulamiento, para lograr la evaporación instantánea y finalmente se separan las dos fases para así poder dirigir el vapor hacia la

⁴ Introducción a la metodología experimental. Carlos Gutiérrez Aranzeta.

turbina y el líquido caliente al colector o mezclador para después reiniciar el ciclo. A continuación se muestra un diagrama del ciclo que se aproxima más a la realidad.

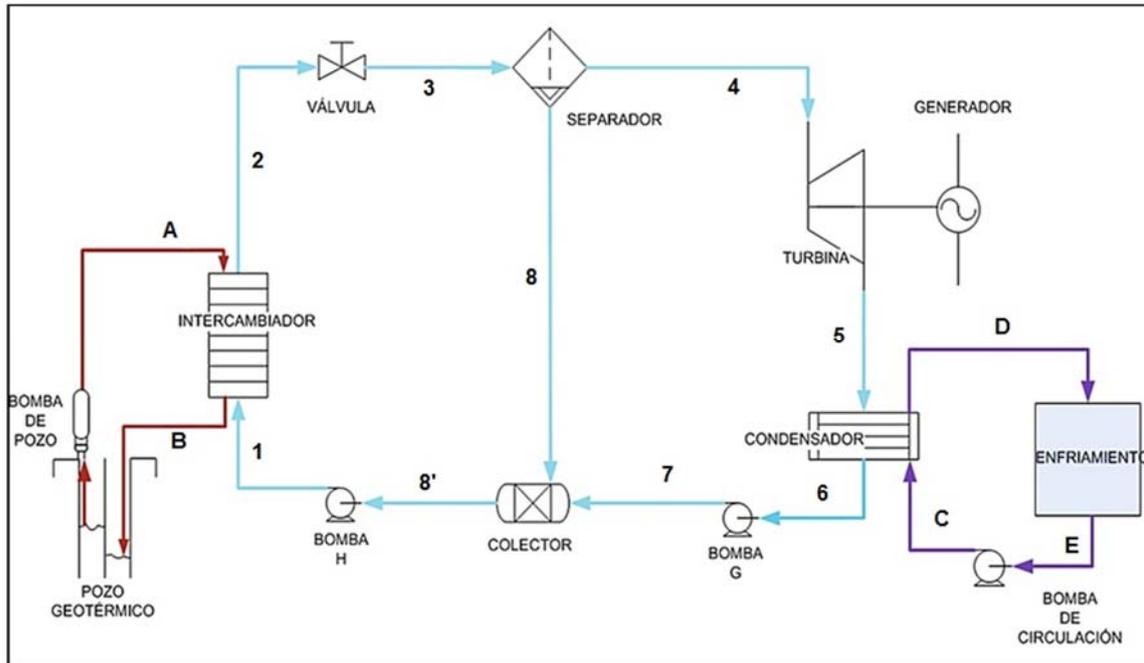


Figura 3.1 Diagrama real del Ciclo Binario de Evaporación Instantánea. [23]

Se realizará brevemente una descripción de los estados termodinámicos del ciclo, haciendo énfasis en los estados 1, 2, 3, 4 y 8, los cuales corresponden al sistema de generación de vapor.

- Estados A y B. Estos corresponden al flujo del fluido geotérmico, al tratarse de recurso de baja entalpía, en el estado B se tiene líquido saturado a una temperatura de entre 120 y 140 °C, a presión de saturación. En el estado B disminuyen ambas propiedades, presión y temperatura, ya que el fluido cede energía en forma de calor y existe una pérdida de presión debida al intercambiador.
- Estados 1 y 2. Durante estos dos estados, el fluido de trabajo obtiene energía del geotérmico, el intercambiador de calor fue diseñado para tener un acercamiento de 3 °C; es decir, el fluido del ciclo en el estado 2 deberá tener una temperatura 3 °C por debajo de la temperatura a la que el fluido geotérmico entra al intercambiador. De igual forma, entre 1 y 2 existe una caída de presión debida al intercambiador de calor, dicha caída tiene un valor permisible de 2.5 bar, tanto para el fluido geotérmico como para el del ciclo.
- Estado 3. Aquí es donde ocurre la evaporación instantánea debida a la despresurización repentina, provocada por el elemento de estrangulamiento. Se trata de un proceso que ocurre a entalpía constante. El valor de la presión en este



estado depende del dispositivo que se utilice y de la cantidad de vapor que se desee obtener, más adelante se explicará cómo se realiza este análisis. La temperatura corresponde a la de saturación ya que existe un cambio de fase.

- Estados 4 y 8. Estos corresponden a la separación de fases del flujo. Se trata de dos procesos a temperatura y presión constantes, la entalpía en 4 corresponde a la del vapor (h_g) y en 8 a la del líquido (h_f). El separador de flujos es diseñado para lograr un 99.9% de separación, haciéndolo muy eficiente.
- Estado 5. En este punto el vapor cedió parte de su energía para realizar trabajo mecánico y hacer girar el rotor de la turbina. Este proceso se considera idealmente isoentrópico, pero en la realidad existe una variación de esta propiedad.
- Estados 6, 7 y 8'. En estado 6 se condensa por completo el fluido del ciclo, el equipo utilizado para realizar este proceso es un condensador de tubos y coraza, ya que ofrece ciertas ventajas respecto a otros tipos de tecnología y particularmente en este ciclo es conveniente utilizar uno de ese tipo. Después en el estado 7 el líquido es dirigido hacia el colector o mezclador, donde se juntará con el líquido caliente separado. Por último en el estado 8' se han mezclado ambas corrientes de flujo para posteriormente reiniciar el ciclo.

La figura 3.2 corresponde a un diagrama de Entropía-Temperatura del Ciclo Binario de Evaporación Instantánea real, en él se puede apreciar que el proceso de expansión en la turbina no corresponde a uno a entropía constante. También, aunque la resolución del gráfico no ayuda mucho, se observa que el proceso de evaporación instantánea sigue una trayectoria isoentálpica.

El análisis completo y cálculos del Ciclo Binario de Evaporación Instantánea se muestra en el Apéndice A al final del presente trabajo.

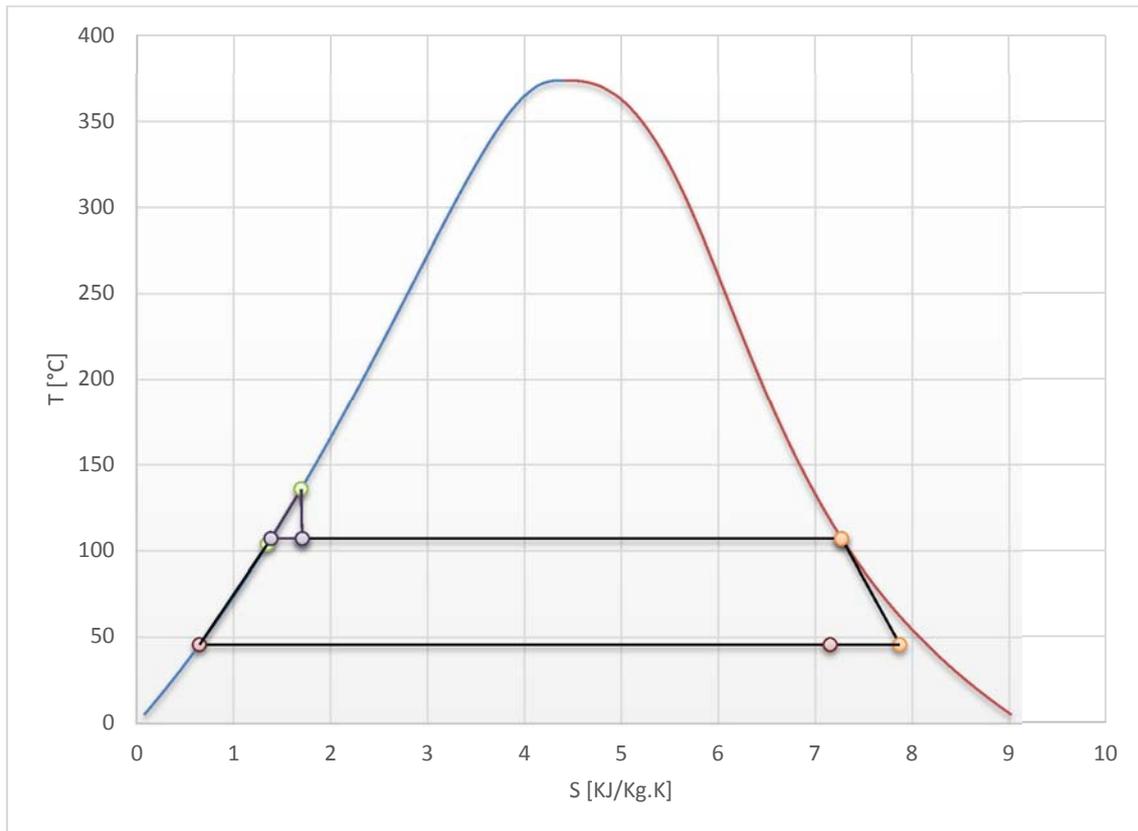


Figura 3.2 Diagrama T-S del Ciclo Binario de Evaporación Instantánea real.

3.5 Análisis teórico de los dispositivos de estrangulamiento para la evaporación instantánea.

El análisis correspondiente a cada uno de los dispositivos se realizó de la siguiente manera: primero se determinaron las condiciones de entrada y salida, las cuales corresponden a la presión, temperatura y flujo másico antes del dispositivo de estrangulamiento. Después, se analizó y calculó la caída de presión provocada por cada uno de los dispositivos. Para dicho análisis se realizaron ciertas consideraciones que serán mencionadas más adelante.

Como se mencionó anteriormente, la evaporación instantánea es provocada por una despresurización repentina que sufre el fluido, esta se origina por el proceso de estrangulamiento debido a la geometría del dispositivo, es decir, el cambio de área de la sección transversal del ducto. En tal proceso, el valor de la presión cae hasta un mínimo, en una región conocida como vena contracta y después se recupera en menor o mayor medida. Dependiendo del número de Reynolds, para flujo laminar la recuperación es considerable y para flujo turbulento es discreta. [24]

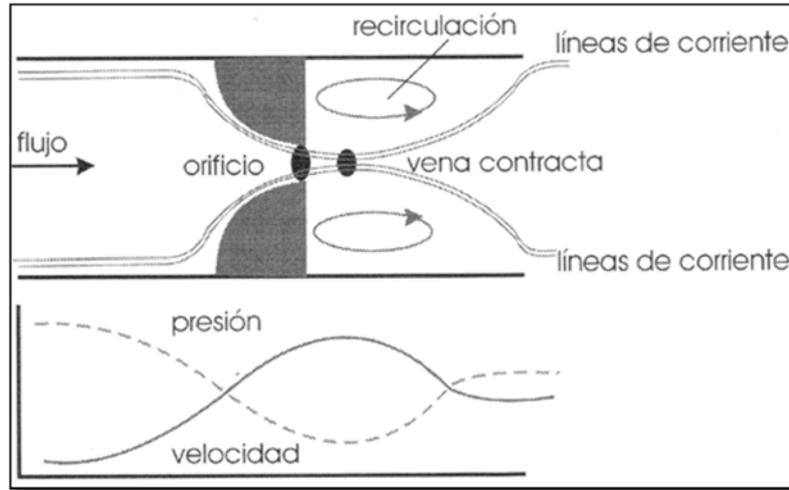


Figura 3.3 Comportamiento general de la presión y velocidad del fluido a través de una placa orificio [24]

Cuando el fenómeno de evaporación rápida ocurre en un flujo interno, es decir en un ducto o tubería, el proceso y su análisis resultan más complicados que si fuera en un recipiente, debido básicamente a tres factores que varían constantemente a lo largo de la dirección del movimiento, la temperatura promedio del fluido y la calidad de la mezcla vapor-líquido. Una vez que se tiene un flujo bifásico ocurren una serie de fenómenos a nivel microscópico, la temperatura del líquido depende en gran medida del proceso de formación y crecimiento de burbujas de vapor en diferentes regiones del flujo; que a su vez, el comportamiento de las burbujas de vapor, depende del patrón de flujo presente en la mezcla de vapor y agua dentro de la tubería.

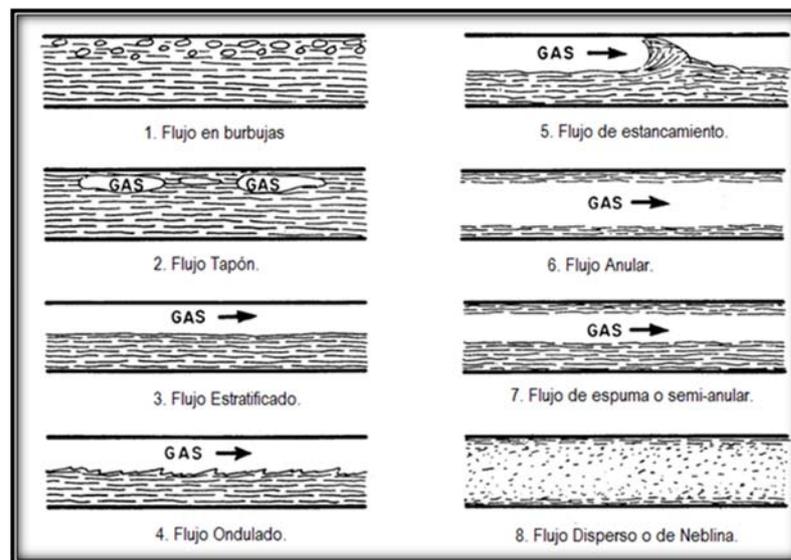


Figura 3.4 Representación de los 8 tipos de patrón de flujo presentes en flujos bifásicos. [25]

Como se puede observar, realizar un análisis profundo del fenómeno resulta un tanto complejo, además de las dificultades presentes en la experimentación a realizar, ya que se necesitarían dispositivos e instrumentos sofisticados para ello. Sumado a lo



anterior, el costo de la investigación aumentaría considerablemente. Es por ello que se optó por realizar un análisis más técnico y en cierta medida con enfoque cualitativo, en donde se tuvieron que hacer principalmente las siguientes consideraciones:

- a) Se asume un modelo de flujo homogéneo, en el cual ambas fases del flujo viajan a través de la tubería en equilibrio termodinámico y a igual velocidad.
- b) El cambio de fase ocurre en la zona de mínima presión, conocida como vena contracta y posteriormente la presión del flujo se recupera en menor medida, ya que se trata de un flujo turbulento.

Los datos de entrada para ambos análisis, placa de orificio y válvula de compuerta, se muestran en las siguientes tablas. La presión se determinó a partir de una medida en laboratorio y la temperatura se consideró la de saturación, los datos de las tuberías se obtuvieron del manual del cobre.

Datos Fluido	
P [MPa]	0.1062
T [MPa]	101.2869
m [Kg/s]	0.21063
ρ [Kg/m³]	957.4218
v [m²/s]	1.282E-08
μ [Pa s]	1.228E-05
h [KJ/Kg]	424.596
Re	1594514.359
Q [m³/s]	0.00022
v [m/s]	1.4924

Tubería	
D. Nominal [in]	0.5
D. Exterior [m]	0.0159
D. Interior [m]	0.0137
Área interna [m²]	0.000147
rugosidad	0.0015

Tubería	
D. Nominal [in]	1
D. Exterior [m]	0.0286
D. Interior [m]	0.0268
Área interna [m²]	0.0005628
rugosidad	0.0015

Tabla 3.1 Datos del fluido y tubería para análisis

Para realizar los cálculos correspondientes a ambos análisis, el de la placa orificio y la válvula de compuerta, se utilizó el Software REFPROP 9.1. Este programa se desarrolló por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnologías (NIST), su funcionamiento se basa en la generación de macros, que mediante ecuaciones de estado, permiten ejecutar rutinas de forma fácil y rápida para la obtención de valores numéricos propiedades termodinámicas de los fluidos internacionalmente más importantes.⁵

3.5.2 Análisis placa de orificio.

Para el análisis teórico de este dispositivo en particular, se utilizó la ecuación de Bernoulli, la cual es una relación obtenida a partir de la ecuación de conservación de cantidad de movimiento. También se utilizó la ecuación de conservación de masa.

⁵ Diseño y construcción de un separador de flujos para un ciclo de generación geotermoeléctrica. Karina Sierra Doroteo.



Además, se introdujo un término en el análisis, el cual es $\beta = \frac{D_o}{D_t}$ ya que la caída repentina de presión depende en gran medida de este valor. Con este término se realizaron múltiples iteraciones con las cuales se pudo determinar el diámetro del orificio de la placa con el que se obtiene la caída de presión necesaria para evaporar la mayor cantidad de líquido posible.

3.5.2.1 La ecuación de Bernoulli.

La ecuación de Bernoulli proporciona una relación entre la presión, la velocidad y la altura. Esta ecuación está muy relacionada con la ecuación de energía para un flujo estacionario y fue formulada por Daniel Bernoulli en 1738. A pesar de que esta ecuación es muy famosa y tiene numerosas aplicaciones, se tiene que tener cuidado al emplearla ya que tiene muchas restricciones, como por ejemplo, su aplicación se limita a casos en donde la fricción es despreciable; sin embargo, todos los fluidos son viscosos y presentan en mayor o menor medida un efecto de la fricción.

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{P_2}{\rho g} \quad (1)$$

Las consideraciones que se tienen que tener en cuenta en la ecuación de Bernoulli son las siguientes:

1. Flujo estacionario.
2. Flujo incompresible.
3. Flujo no viscoso
4. Flujo unidimensional.

Cuando se obtuvo la ecuación de Bernoulli tampoco se consideró la transferencia de calor o trabajo, la razón es que en fluidos reales, los intercambios de calor y trabajo están ligados a efectos de fricción, lo cual invalida la suposición de flujo sin fricción. [19]

3.5.2.2 Cálculos.

Para este análisis, además de las consideraciones a y b, se tomaron en cuenta las que implican el uso de la ecuación de Bernoulli. La justificación para contemplar las consideraciones 2, 3 y 4 es la siguiente:

- Flujo incompresible. Esta consideración es válida incluso después de la placa orificio, donde se tiene un flujo bifásico, debido a que el número de Mach es inferior a 0.3.
- Flujo no viscoso. Es un hecho que todos los fluidos son viscosos y que las paredes sólidas inducen efectos de fricción, sin embargo, las pérdidas son mínimas y podrían despreciarse en un análisis general.

- Flujo unidimensional. Las líneas de corriente se podrían considerar unidireccionales aguas arriba y debajo de la placa de orificio.

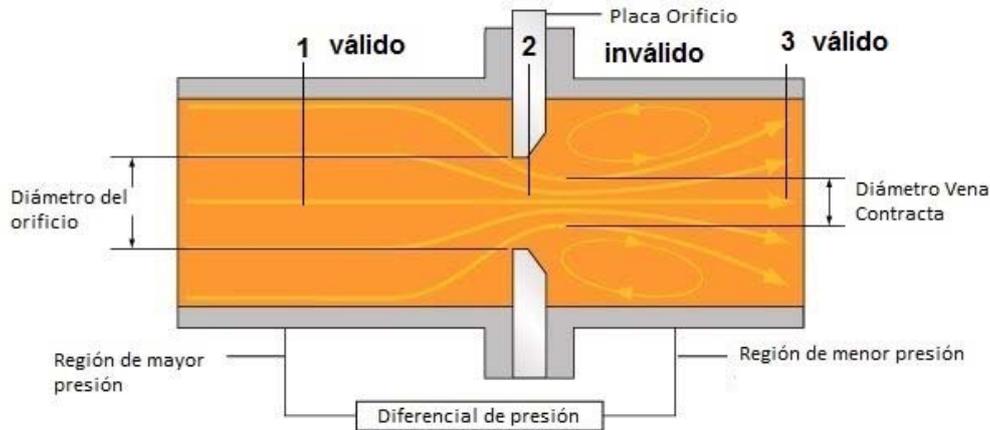


Figura 3.5 Esquema de sistema de placa orificio y puntos de análisis de Bernoulli. [18]

La figura 3.5 muestra las regiones donde la ecuación de Bernoulli es válida. Los puntos 1 y 3 serán los únicos que se analizarán, ya que ahí es donde el modelo aplica. Como se mencionó anteriormente, además de la ecuación de Bernoulli, también se utilizó la ecuación de conservación de masa.

$$v_1 A_1 \rho_1 = v_2 A_2 \rho_2 = \dot{m} \quad (2)$$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = \dot{Q} \quad (3)$$

De la ecuación (3) se puede inferir lo siguiente:

$$v_1 = \frac{\dot{Q}}{A_1} \text{ y } v_2 = \frac{\dot{Q}}{A_2}$$

Sustituyendo en la ecuación (1) y debido a que no hay diferencia de alturas entre los puntos 1 y 2, es decir, $z_1 = z_2$

$$\frac{\dot{Q}^2}{2A_1^2} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{\dot{Q}^2}{2A_2^2} + \frac{P_2}{\rho}$$

Agrupando términos:

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \dot{Q}^2 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) \right]$$

Desarrollando el término entre paréntesis:

$$\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} = \frac{A_1^2 - A_2^2}{A_2^2 A_1^2} = \frac{A_1^2}{A_2^2 A_1^2} - \frac{A_2^2}{A_2^2 A_1^2} = \frac{1}{A_2^2} \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right)$$



Sustituyendo:

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \dot{Q}^2 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{A_2^2} \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right) \right) \right]$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{D_o^2}{D_t^2} = \beta^2$$

Sustituyendo:

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \dot{Q}^2 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{A_2^2} (1 - \beta^2) \right) \right]$$

Despejando:

$$P_2 = P_1 - \frac{\rho \dot{Q}^2 (1 - \beta^2)}{2 A_2^2} \quad (4)$$

La presión y temperatura en el punto 1 son conocidas, ya que se tratan de condiciones iniciales. Con estas dos propiedades intensivas e independientes, se puede definir por completo el estado termodinámico en el punto 1. En el punto 3 y gracias a la consideración b, se puede decir lo siguiente:

$$P_2 \approx P_3$$

Conociendo la presión y tomando en cuenta que el proceso de estrangulamiento es uno a entalpía constante, se puede conocer la entalpía en el punto 3 y con esto quedaría también totalmente definido el estado termodinámico en dicho punto. Consecuentemente, se puede conocer la calidad, densidad y temperatura del fluido en tal punto. Los resultados obtenidos del análisis son los siguientes:

Puntos	1		3				Resultados		
	β	P [MPa]	T [°C]	P [MPa]	ρ [Kg/m ³]	v [m/s]	T [°C]	X	D. orificio [m]
0.1	0.1062	101.2869	-10.4778	ERROR	ERROR	ERROR	ERROR	0.0014	0.000001
0.2	0.1062	101.2869	-0.5592	ERROR	ERROR	ERROR	ERROR	0.0027	0.000006
0.3	0.1062	101.2869	-0.0244	ERROR	ERROR	ERROR	ERROR	0.0041	0.000013
0.4	0.1062	101.2869	0.0656	16.2647	23.0087	88.2248	2.41%	0.0055	0.000024
0.5	0.1062	101.2869	0.0902	59.4106	6.2991	96.7394	0.85%	0.0069	0.000037
0.6	0.1062	101.2869	0.0990	136.9548	2.7325	99.3264	0.37%	0.0082	0.000053
0.7	0.1062	101.2869	0.1028	259.6189	1.4415	100.3771	0.17%	0.0096	0.000072
0.8	0.1062	101.2869	0.1046	435.9849	0.8584	100.8755	0.08%	0.0110	0.000094

Tabla 3.2 resultados del análisis de la placa orificio.

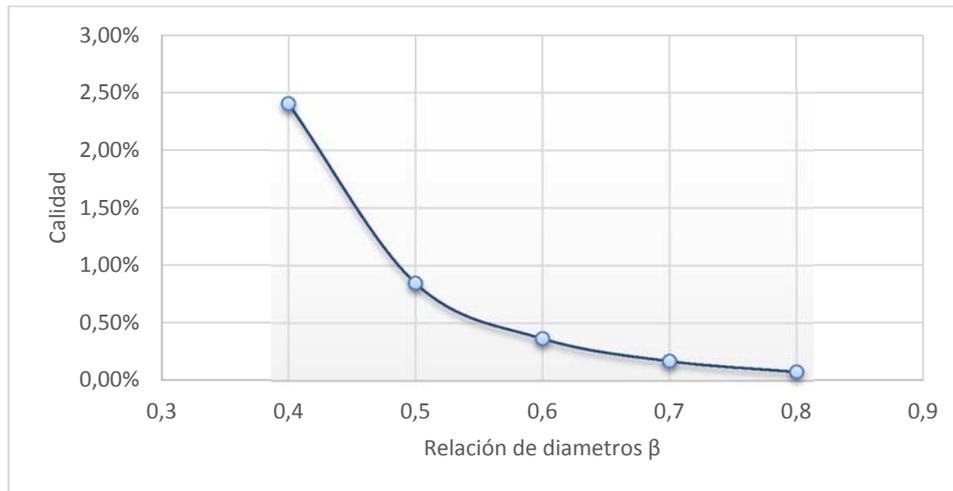


Figura 3.6 Gráfica que muestra la relación del diámetro del orificio y la calidad de vapor obtenida.

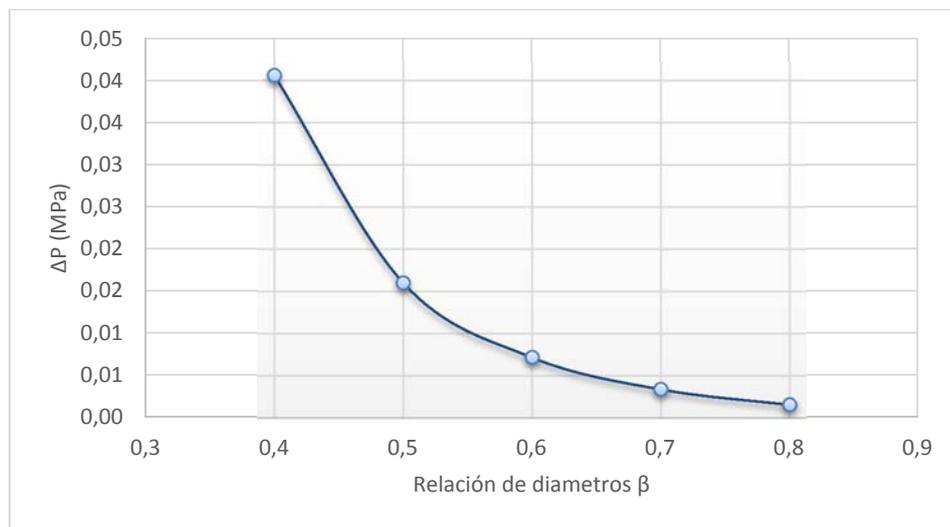


Figura 3.7 Gráfica que muestra la relación entre el diámetro del orificio y la caída de presión provocada.

Como se mencionó anteriormente, la tabla 3.2 arroja los resultados de las iteraciones que se realizaron. Se varió el factor β para determinar la geometría óptima de la placa orificio.

De las gráficas anteriores se puede observar que con una relación de diámetros de 0.4 y un diámetro de orificio de 5.5 milímetros, se obtiene teóricamente la mayor cantidad de vapor. Sin embargo, se puede percibir que la densidad del fluido cambia considerablemente y como consecuencia su velocidad se incrementa bastante, por lo cual difícilmente podría llevarse a cabo el fenómeno. Después de definir la geometría necesaria de la placa orificio, se diseñaron y manufacturaron un par de bridas con rosca para tubería de media pulgada, hechas de latón, y placas con diferentes orificios para realizar pruebas. De esta forma se evaluó y comparó el desempeño de la placa orificio teórica y experimentalmente.

3.5.2.3 Diseño y manufactura.

Se realizaron los modelos computacionales de las bridas que portan a la placa orificio y de la placa también. Las dimensiones se basaron en el espacio disponible en la instalación de tubería. Las bridas cuentan con rosca estándar interna para tubería de media pulgada y un diámetro exterior de dos pulgadas. Están hechas de latón y su diámetro exterior es de dos pulgadas. Tienen barrenos para tornillos de 1/8 de pulgada, en el apéndice B se pueden apreciar los planos correspondientes.

En cuanto a la placa orificio, están hechas a partir de lámina de acero inoxidable de 3 mm de espesor, también tienen barrenos de 1/8 de pulgada y su diámetro exterior también es de 2 pulgadas. Se fabricaron tres placas diferentes para comprobar los datos experimentales.

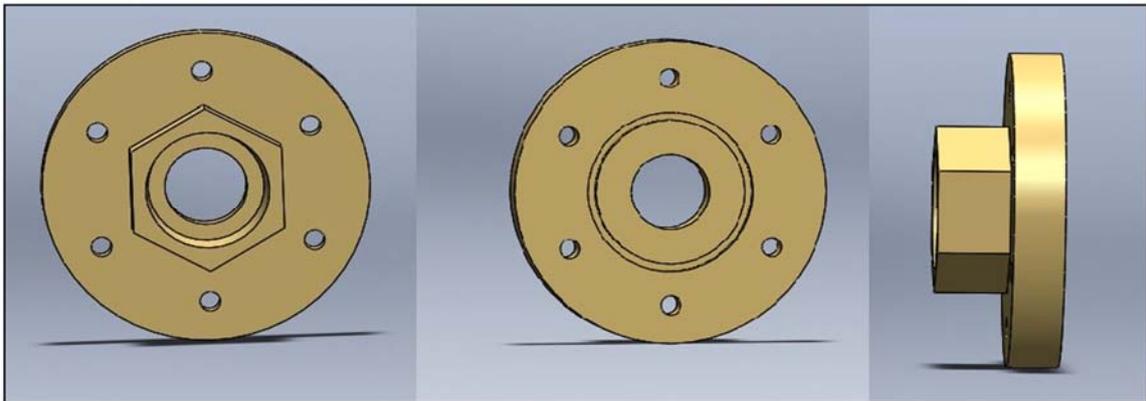


Figura 3.8 modelo tridimensional de bridas porta-placa.

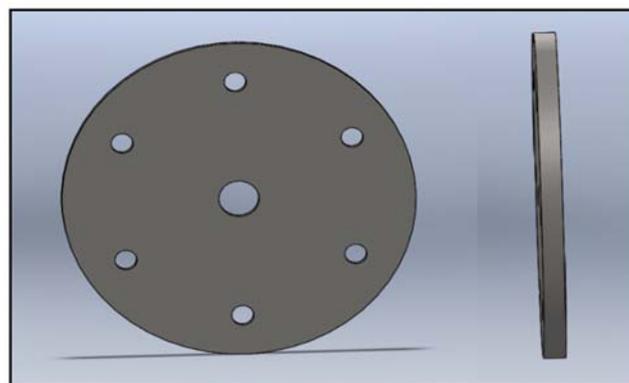


Figura 3.9 modelo tridimensional de la placa orificio.

Las siguientes tres figuras muestran los modelos finales de las bridas porta-placa y placas orificio. Se puede observar los empaques y tornillos empleados para hermetizar la unión entre las bridas y la placa orificio. También se puede observar en la figura 3.12 todos los elementos ya instalados en el sistema experimental de generación de vapor, se puede notar los dos sensores de presión aguas arriba y debajo de la placa orificio.



Figura 3.10 Elementos del sistema bridas-placa orificio.

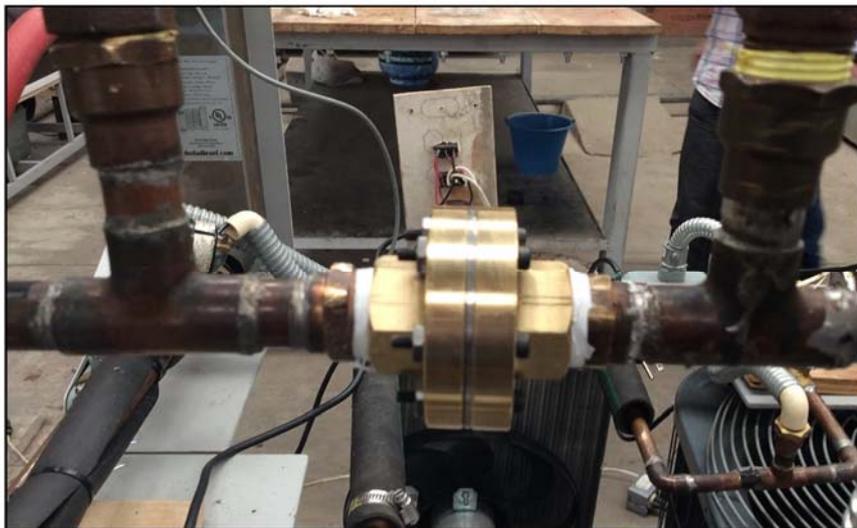


Figura 3.11 Placa orificio con bridas instaladas.

3.5.3 Análisis Válvula de compuerta.

Para el análisis de este dispositivo se tomaron en cuenta las mismas consideraciones que para la placa orificio, excepto la del flujo no viscoso, ya que en este caso se consideró la pérdida por fricción provocada por la válvula. Las ecuaciones utilizadas fueron la de la energía, de conservación de masa y de Darcy con la cual se calculó la caída de presión provocada por la válvula.

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + h_f - h_{bomba} + h_{turbina} \quad (5)$$

$$h_{f_{total}} = \frac{v^2}{2g} \left(\frac{fL}{d} + \sum K \right) \quad (6)$$

La ecuación 5 corresponde a la ecuación de Darcy, en ella se incluyen las pérdidas por fricción a lo largo de la tubería y las pérdidas menores o localizadas, estas son pueden ser provocadas por accesorios, uniones de tuberías o ensanchamientos y contracciones graduales o bruscos, pero en este caso se debe únicamente a la válvula de compuerta que está parcialmente cerrada. Generalmente estas pérdidas se miden experimentalmente y se correlacionan con los parámetros de flujo. Los resultados, especialmente para las válvulas, dependen del fabricante. La relación para determinar las pérdidas menores está definida como la relación entre la pérdida de carga a través del elemento y la altura cinética del sistema de tuberías. [19]

$$h_m = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (7)$$

$$K = \frac{h_m}{v^2/2g} \quad (8)$$

Al igual que en la placa orificio, las condiciones de entrada están definidas y corresponden a las de la tabla 3.2. Para calcular la presión después de la válvula, es necesario primero conocer el coeficiente de pérdidas, por lo tanto se tuvo que caracterizar experimentalmente la válvula. Se obtuvo un modelo que describe la variación del coeficiente de pérdidas respecto a la abertura de la válvula.

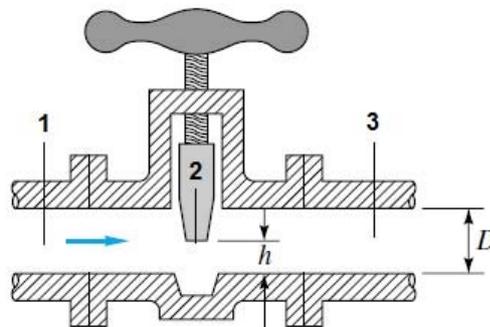


Figura 3.12 Esquema de puntos de análisis para flujo a través de una válvula de compuerta.

3.5.3.1 Caracterización de la válvula de compuerta.

A partir de varias pruebas, en donde se midió la caída de presión asociada a distintas fracciones de abertura de la válvula, se obtuvieron diferentes curvas características, de las cuales se consiguieron funciones polinomiales. Finalmente se seleccionó el modelo que más se aproxima a las mediciones hechas. Lo anterior, basándose en el parámetro estadístico conocido como coeficiente de determinación o R^2 , el cual indica la calidad del modelo para predecir o replicar la curva correspondiente a la muestra de datos. Se puede observar que las pérdidas son inmensas cuando la

abertura es pequeña, pero el valor de K se reduce exponencialmente cuando el ángulo de abertura es mayor.

La válvula que se utilizó fue una de la marca rugo con las siguientes características:

Conexión	Extremos soldables
Cierre compresión	200 [lbs/pulg] WOG
Medida	½" ó 13 [mm]
Material	latón

Tabla 3.3 Características de la válvula de compuerta



Figura 3.13 Válvula de compuerta marca rugo

A continuación se muestran las gráficas con las curvas características de tres eventos diferentes y sus respectivos modelos de tendencia.

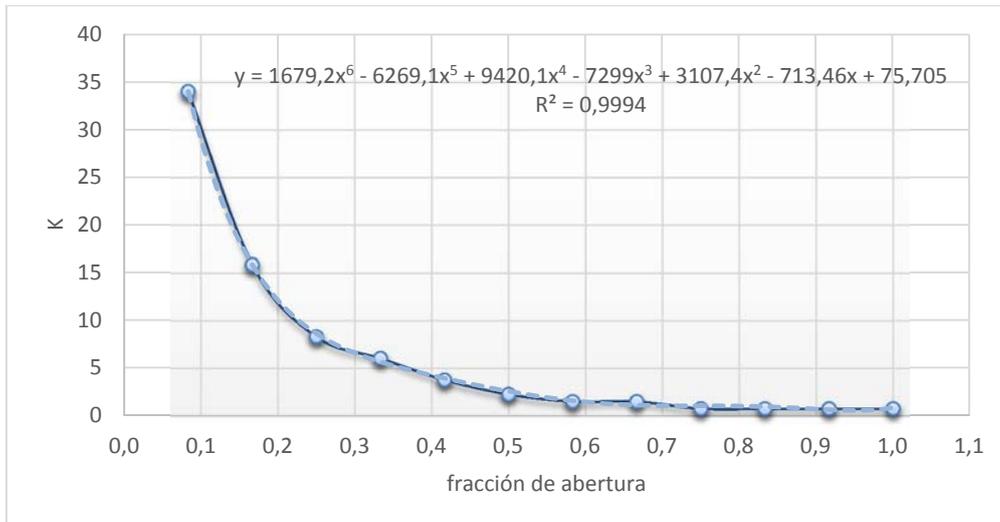


Figura 3.14 Curva característica del evento 1.

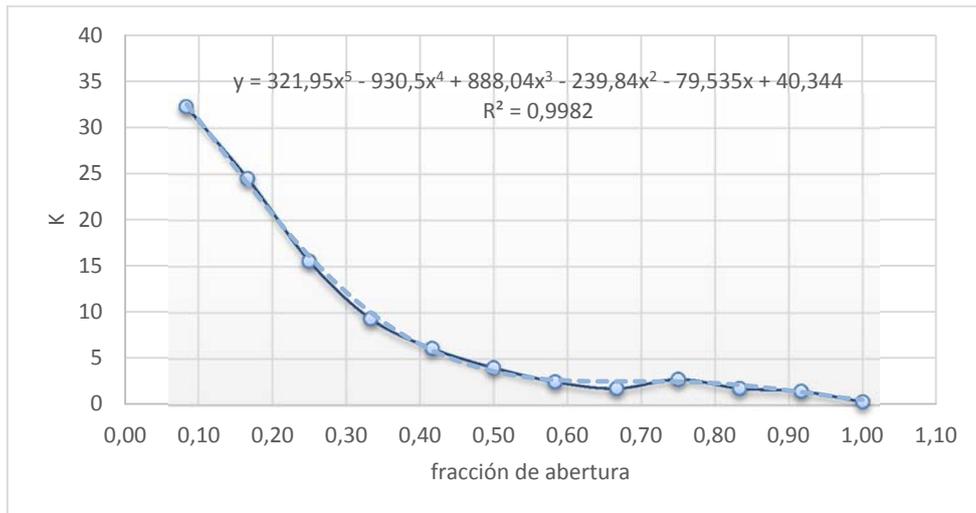


Figura 3.15 Curva característica del evento 2.

En la siguiente figura se puede observar una perturbación en el experimento en la abertura de la válvula de 0.25, lo cual provocó una extraña tendencia en la caída de presión y por consecuencia en la determinación del coeficiente de pérdidas. Por tal motivo, el modelo obtenido con estos datos no se consideró como candidato para ser el utilizado.

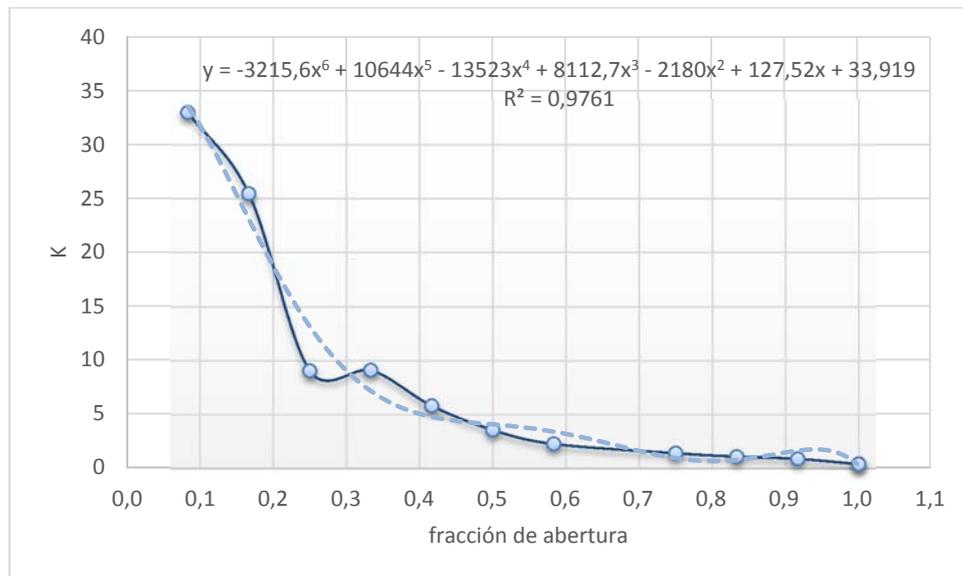


Figura 3.16 Curva característica del evento 3.



Figura 3.17 Válvula de compuerta instalada en el prototipo experimental.

Para cada evento se obtuvieron dos modelos de diferente grado y debido a que cada uno de ellos tiene un coeficiente de determinación aceptable, es decir, mayor a 0.9; se realizó un análisis para determinar el grado adecuado del modelo polinomial. Este análisis consistió en calcular el porcentaje de error para los modelos de sexto y quinto grado

A partir de los resultados se determinó que el polinomio que mejor describe el comportamiento de la válvula es el siguiente:

$$K = 1679.2fa^6 - 6269.1fa^5 + 9420.1fa^4 - 7299fa^3 + 3107.4fa^2 - 713.46fa + 75.705$$

Donde fa es el factor de abertura de la válvula.

Por último se realizaron los cálculos correspondientes para determinar el valor de la presión en el punto 3.

Apertura	[°]	ΔP [KPa]	K_{exp} [1]	K_{teo6} [1]	%E	K_{teo5} [1]	%E
1.00	540	0.836	0.7552	0.8450	11.89%	0.5600	25.85%
0.92	495	0.836	0.7552	0.6301	16.57%	1.1324	49.94%
0.83	450	0.836	0.7552	0.9356	23.89%	0.6788	10.12%
0.75	405	0.8368	0.7559	1.0101	33.62%	0.5083	32.77%
0.67	360	1.6736	1.5119	1.0845	28.27%	0.9802	35.17%
0.58	315	1.6736	1.5119	1.5489	2.45%	1.8956	25.38%
0.50	270	2.5105	2.2679	2.5344	11.75%	2.8884	27.36%
0.42	225	4.1841	3.7798	3.8992	3.16%	3.8171	0.99%
0.33	180	6.6949	6.0480	5.6205	7.07%	5.1560	14.75%
0.25	135	9.2052	8.3157	8.5907	3.31%	8.3864	0.85%
0.17	90	17.573	15.8749	15.8184	0.36%	16.3885	3.24%
0.08	45	37.675	34.0345	34.0349	0.00%	33.8326	0.59%

Tabla 3.4 Evaluación de dos modelos de grado diferente para determinar el coeficiente de pérdidas k .



3.5.3.2 Cálculos.

Después de realizar la caracterización de la válvula y de obtener el modelo adecuado para determinar el coeficiente de pérdidas, se realizaron los cálculos correspondientes para determinar las propiedades termodinámicas del fluido después de atravesar la válvula de compuerta.

Primero se partió de la ecuación de la energía, es decir, la ecuación 4. Al igual que en el caso de la placa orificio, no existe diferencia de alturas, se simplifica el término correspondiente. Después, como se están analizando los puntos 1 y 3 y por conservación de masa, se puede reducir la ecuación a la siguiente:

$$\frac{P_1}{\rho} = \frac{P_3}{\rho} + gh_m$$

La carga debida a la fricción se reduce a la pérdida localizada o menor, debida a la válvula. Es decir:

$$h_m = K(fa) \frac{v^2}{2g}$$

Se debe mencionar que el valor de K está basado en la velocidad media del ducto, es decir, $v = \frac{Q}{A}$ y no en la velocidad crecida del flujo, justo al pasar por el espacio entre la tubería y la compuerta de la válvula. Al sustituir y despejar la presión en el punto 3, se tienen lo siguiente:

$$P_3 = P_1 - K(fa) \left(\frac{\rho v^2}{2} \right)$$

ó

$$P_3 = P_1 - (1679.2fa^6 - 6269.1fa^5 + 9420.1fa^4 - 7299fa^3 + 3107.4fa^2 - 713.46fa + 75.705) \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) \quad (9)$$

Una vez teniendo el modelo final y sabiendo que el proceso de estrangulamiento es uno que ocurre a entalpía constante, se procedió a realizar los cálculos correspondientes para definir las propiedades termodinámicas del flujo después de atravesar la válvula de compuerta.

Datos entrada					Resultados					
P [MPa]	T [°C]	Apertura	Apertura [°]	Área [m ²]	P [MPa]	ΔP [KPa]	ρ [Kg/m ³]	T [°C]	X [%]	v [m/s]
0.1062	101.2869	1.00	540	0.00012668	0.1053	0.9775	545.4132	101.0258	0.05%	0.66
0.1062	101.2869	0.92	495	0.00012253	0.1055	0.7230	614.9319	101.0940	0.04%	0.59
0.1062	101.2869	0.83	450	0.00011510	0.1052	1.0317	532.5407	101.0113	0.05%	0.69
0.1062	101.2869	0.75	405	0.00010569	0.1051	1.0998	517.1953	100.9930	0.06%	0.72
0.1062	101.2869	0.67	360	0.00009482	0.1050	1.1715	501.9305	100.9738	0.06%	0.74
0.1062	101.2869	0.58	315	0.00008282	0.1045	1.6615	417.1857	100.8420	0.08%	0.89
0.1062	101.2869	0.50	270	0.00006996	0.1035	2.7085	305.0031	100.5586	0.14%	1.22
0.1062	101.2869	0.42	225	0.00005646	0.1020	4.1609	220.2178	100.1615	0.21%	1.70
0.1062	101.2869	0.33	180	0.00004258	0.1002	5.9942	161.2246	99.6536	0.31%	2.32
0.1062	101.2869	0.25	135	0.00002866	0.0970	9.1597	107.9400	98.7582	0.47%	3.47
0.1062	101.2869	0.17	90	0.00001525	0.0893	16.8653	55.8526	96.4728	0.90%	6.70
0.1062	101.2869	0.08	45	0.00000369	0.0699	36.2889	19.6614	89.8852	2.10%	19.02

Tabla 3.5 Resultados del análisis de la válvula de compuerta.

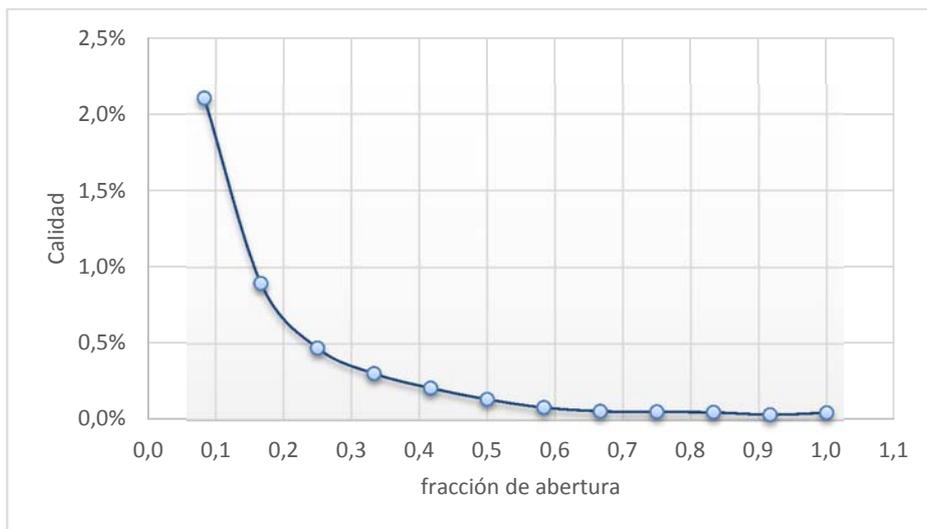


Figura 3.18 Gráfica que muestra la relación entre la abertura de la válvula y la calidad obtenida.

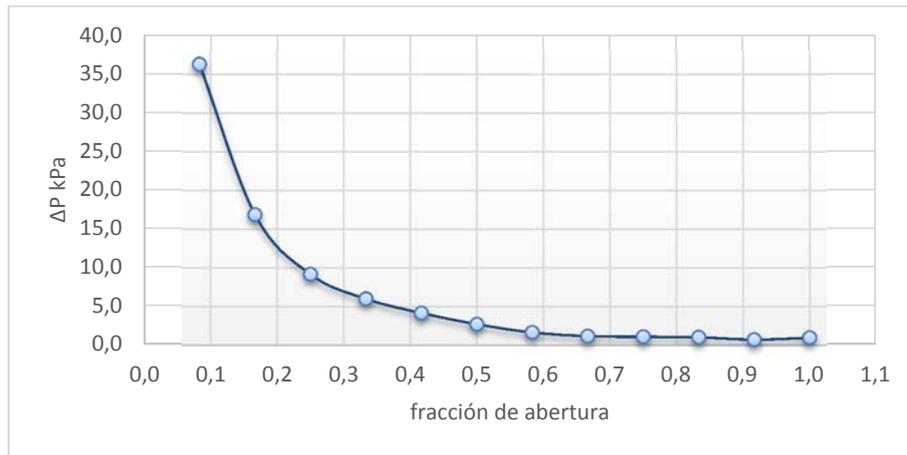


Figura 3.19 Gráfica que muestra la relación entre la abertura de la válvula y la caída de presión provocada.

De las gráficas anteriores se puede notar que con una fracción de abertura del 8% o 45° , se obtiene la mayor cantidad de vapor generada, gracias a que la caída de presión en ese punto es la máxima. También se puede observar que la velocidad del flujo se conserva dentro de un rango admisible, el cual es entre 25 y 40 m/s.

A continuación se muestra una gráfica en donde se comparan los valores de caída de presión para cada fracción de abertura, obtenidos de manera experimental y analíticamente.

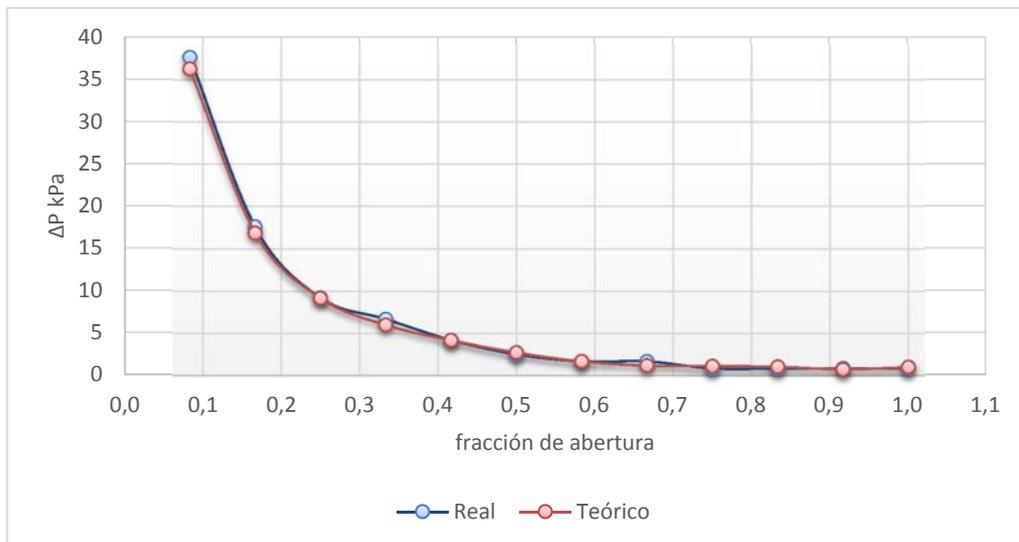


Figura 3.20 Gráficas con datos teóricos y experimentales de caída de presión.

A partir de la gráfica anterior se puede decir que el modelo obtenido para calcular el coeficiente de pérdidas k , es aceptable y con el podemos replicar la información real, es decir predecir la caída de presión provocada por la válvula. Sin embargo, ese no es el objetivo principal del presente trabajo de tesis, por lo cual es necesario determinar una relación entre la caída de presión provocada y la cantidad de vapor generada.



3.6 Sistema experimental de generación de vapor

Como se mencionó anteriormente, el sistema experimental de generación de vapor es un modelo prototipo de una sección del Ciclo Binario de Evaporación Instantánea y cuyo objetivo es únicamente obtener la cantidad de vapor solicitada bajo las condiciones determinadas en el análisis del CBEI. Este sistema consta de los siguientes equipos:

- Calentador doméstico
- Intercambiador de calor de placas
- Dispositivo de estrangulamiento
- Separador de flujos centrífugo
- Mezclador
- Radiador
- Bombas

El funcionamiento del sistema es el mismo que en el CBEI, solo que el fluido geotérmico es simulado con un calentador doméstico y el vapor después del separador de flujos es descargado directamente a la atmosfera. También, al no estar instalada la turbina y el sistema de enfriamiento, se utiliza un radiador para disminuir la temperatura al fluido del ciclo y de esa forma hacer repetitivo el proceso.

La conexiones del sistema de generación de vapor se hicieron con tubería de cobre tipo M ya que estas tuberías de temple rígido tienen características favorables para la conducción de fluidos en instalaciones hidráulicas de agua fría y caliente.

Tubería de cobre temple rígido Tipo M								
Medida Nominal	Diámetro Exterior	Diámetro Interior	Espesor	Peso	Peso por tramo	Presión Máxima	Presión constante	Flujo
Pulgadas Milímetros	Pulgadas Milímetro	Pulgadas Milímetro	Pulgadas Milímetro	Lb/pie Kg/m	Libras Kilogramos	PSI Kg/cm ²	PSI Kg/cm ²	GPM LPM
½"	0.625"	0.569"	0.028"	0.204	4.083	4,032	806	4.064
12.7	15.875	14.453	0.711	0.304	1.854	283.45	56.66	15.382
1"	1.125"	1.025"	0.050"	0.655	13.114	4,000	800	19.799
25	28.575	26.035	1.27	0.976	5.954	281.2	56.24	74.94

Tabla 3.6 Datos técnicos de tubería de cobre tipo M. [26]

La tabla anterior muestra las especificaciones de la tubería de cobre, en algunas secciones se utilizó tubería de media pulgada y en otras de una, según fue necesario.

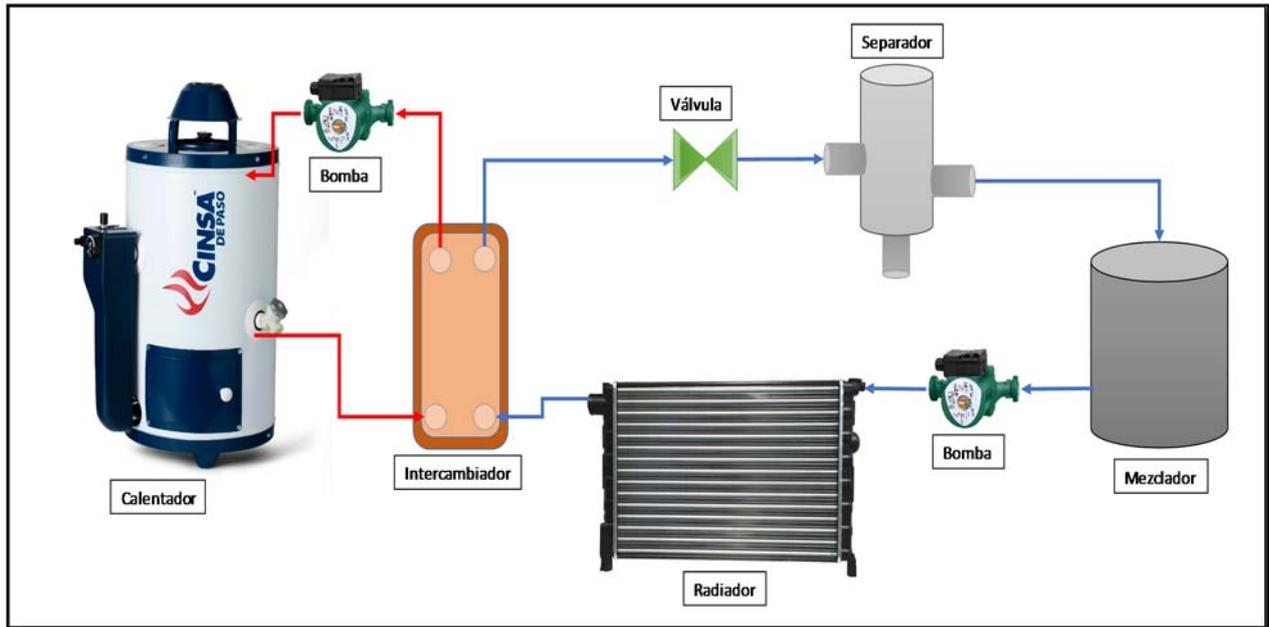


Figura 3.21 Esquematización del sistema de generación de vapor

La figura 3.3 muestra el esquema del sistema de generación de vapor, cabe mencionar que este tuvo una evolución en su estructura hasta llegar a un modelo final, esto por diversos detalles que fueron causando el rediseño del sistema mientras se construía. Las siguientes figuras muestran el desarrollo del sistema, desde su primera etapa hasta la tercera, donde se puede observar que ya se cuenta con instrumentación digital para hacer el monitoreo y medición de las propiedades termodinámicas, además se observa la presencia de aislante térmico en las secciones que se consideró necesario.



Figura 3.22 Primera etapa del sistema experimental de generación de vapor.



Figura 3.23 Segunda etapa del SEGV.



Figura 3.24 Diferentes vistas del segundo modelo del SEGV



Figura 3.25 Tercera etapa del sistema experimental



Figura 3.26 Acercamiento a válvula de compuerta y separador de flujos.

3.7 Equipos utilizados en el SEGV

A continuación se dará una breve explicación de cada uno de los equipos, su funcionamiento, algunas aplicaciones y las consideraciones hechas en el sistema experimental de generación de vapor.

3.7.1 Calentador doméstico

Se trata de un calentador semiautomático de depósito, con capacidad de treinta y ocho litros. Este tipo de calentadores proporcionan un excelente flujo de agua caliente por varios minutos, gracias a los recubrimientos térmicos que utiliza. La temperatura promedio que alcanza el agua con este tipo de calentadores es de 70 °C.

3.7.1.1 Modificaciones hechas

Las condiciones de diseño del calentador establecen que la temperatura máxima de operación es de 70 °C, ya que esta es controlada por el termostato. Por otra parte, la presión de operación del calentador tiene un valor permisible de $2 \frac{Kg}{cm^2}$, ya que tiene conectada una válvula de alivio que se activa al alcanzar dicha presión o al llegar a 90 °C. La temperatura del fluido geotérmico solicitada es de 120 °C, por lo tanto fue necesario modificar el calentador doméstico; se le retiró el termostato y se conectó directamente a la toma de gas, de esta forma se pudo alcanzar la temperatura deseada. Para mitigar las limitaciones que se tenían con la válvula de alivio se optó por retirarla. Después de consultar la ficha técnica del calentador, se determinó que el tanque soporta una presión máxima de 10 bares, por lo tanto, se consideró pertinente esta decisión ya que la presión de operación en el ciclo es de 3 bares.



Figura 3.27 Válvula de alivio y termostato.



Figura 3.28 Calentador doméstico modificado.

3.7.2 Intercambiador de placas

El intercambiador de calor fue diseñado específicamente para el CBEI, pero su manufactura resultó costosa al tratarse de una sola pieza. Es por eso que se optó por comprar uno que existiera comercialmente y con características semejantes a las del diseño previo.

De esta forma, se trata de un intercambiador de calor de placas de la marca *DudaDiesel*, conformado por 30 placas fabricadas de acero inoxidable tipo 304, con dimensiones de 7.3 X 31.5 cm. Este intercambiador tiene un *pinch* de 5°C, es decir, el fluido del ciclo sale a una temperatura de 5°C menor a la que entra el fluido del calentador doméstico. También tiene una caída de presión de 0.4 bar para ambos flujos. Este tipo de intercambiador es comúnmente utilizado en sistemas de refrigeración, calefacción por suelo radiante, enfriamiento de cerveza, aire acondicionado y sistemas de calentamiento solar. [27]



Figura 3.29 Disposición de fluidos entre cada par de placas



Figura 3.30 Intercambiador de calor de placas marca DudaDiesel.

3.7.3 Separador de flujos

El separador utilizado en el sistema de generación de vapor es uno del tipo centrífugo, el cual opera de la siguiente manera; la mezcla de líquido y vapor entran al separador, al chocar con la pared, se logra que el fluido cambie su momentum. La fuerza de gravedad actúa sobre la fase líquida al ser más densa que el vapor, provocando la separación de ambas fases.

Este dispositivo es muy utilizado en la industria geotérmica, ya que generalmente se tienen pozos en donde se extrae fluido bifásico y es necesario separar el vapor, en varias etapas de una central geotermolétrica.



Figura 3.31 Separador de vapor de la central geotermolétrica Los Azufres.

En la primera etapa del sistema de vapor, se manufacturo un separador prototipo de acrílico, una vez comprobada su funcionalidad se mandó a construir uno de acero inoxidable. La siguiente figura muestra la evolución de estos dos modelos.



Figura 3.32 Evolución de los modelos del separador de vapor.

3.8 Metodología del experimento.

El experimento se realizó dentro de un laboratorio del instituto de ingeniería, donde se instaló el Sistema Experimental de Generación de vapor. La metodología empleada fue la siguiente:

- Por medio del boiler se calentó el fluido que simula al geotérmico, hasta una temperatura de 130 °C aproximadamente y una presión estimada de 615 KPa. Este proceso dura alrededor de 70 minutos.
- Se enciende la bomba para circular el fluido de trabajo en frío, durante alrededor de 5 minutos. En el caso de la válvula, se ajusta la abertura a 45° y progresivamente se modifica la misma durante el experimento, con un incremento de 45 °. Cuando se utiliza la placa orificio simplemente se regula el flujo con ayuda de una válvula.
- Una vez alcanzadas las condiciones del boiler mencionadas anteriormente, se abre la válvula de salida del mismo para que simultáneamente con el fluido de trabajo, fluya dentro del intercambiador de calor y se realice la transferencia de energía, de un fluido a otro.
- El fenómeno de evaporación instantánea tarda en ocurrir un poco menos de un minuto. Una vez que sale vapor de la salida del condensador, solamente se observa el comportamiento del sistema por 10 minutos y posteriormente se modifica la abertura de la válvula y se observan los cambios durante la misma cantidad de tiempo.

CAPÍTULO 4

En el presente capítulo se explica brevemente el funcionamiento de los instrumentos de medición utilizados, así como la metodología de medición empleada. Por otra parte, se realizó el análisis correspondiente de la información obtenida a partir de las sesiones de experimentación desarrolladas. Finalmente se validan los modelos obtenidos para determinar las presiones después de cada dispositivo de estrangulamiento.

4. ANÁLISIS DE DATOS EXPERIEMANTLES

4. ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES

A continuación se describirá el proceso de análisis de la información recolectada a partir de varios eventos de experimentación, se hablará un poco acerca de los instrumentos de medición utilizados y por último se validarán los modelos obtenidos del análisis, por medio de gráficas y tablas.

4.1 Sistema de instrumentación.

Se instalaron varios tipos de instrumentos de medición a lo largo del circuito de tuberías del Sistema Experimental de Generación de Vapor, tales como transductores de presión, sensores de temperatura y un medidor de flujo. Las características de cada uno de ellos se muestran en las siguientes tablas y la configuración de la instalación se puede observar en la figura 4.1.

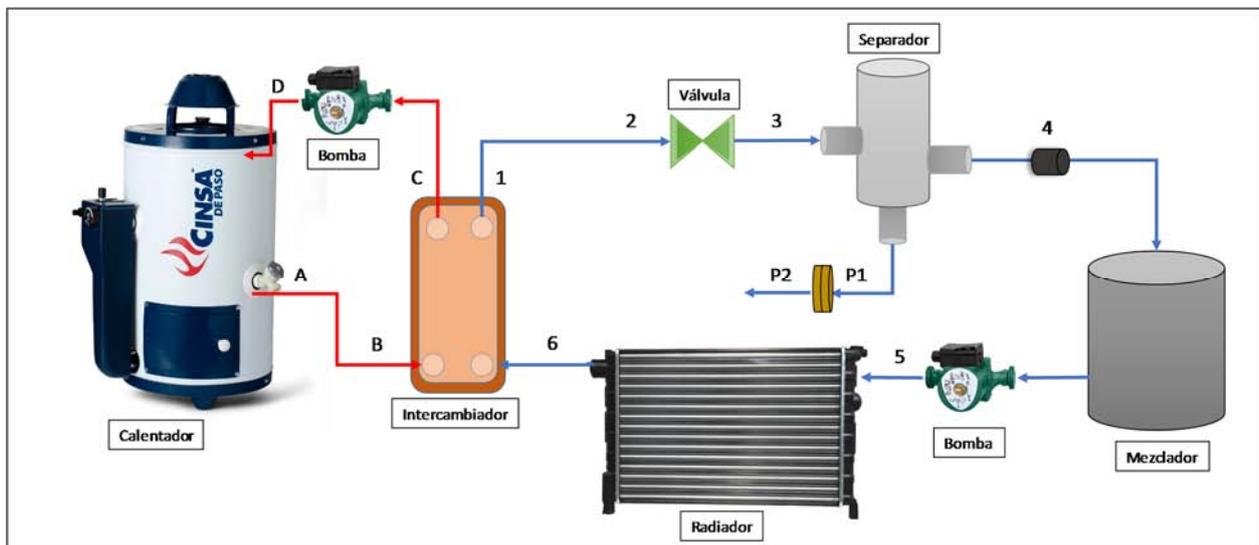


Figura 4.1 Configuración del sistema de instrumentación.

Punto	Medición
A	T
B	P, T
C	P, T
D	P
1	P, T
2	P
3	P, T
4	P, T, flujo líquido
5	T
6	P, T

Tabla 4.1 Configuración de medición del fluido de trabajo y fluido geotérmico

4.1.1 Sensores de presión.

Se utilizaron dos tipos de transductores de presión con diferentes características. Para los puntos 1 a 6 se utilizó el dispositivo marca Honeywell ya que como se puede observar en la tabla 4.1, resulta muy apropiado para las necesidades del ciclo, las condiciones de operación están dentro del rango del instrumento, tanto de temperatura como de presión. Además, son dispositivos muy confiables ya que el rango de temperatura compensada es el mismo de la temperatura de operación.

Transductor de presión Honeywell PX2EN1XX100PAAAX	
Conexión	1/4-18 NPT
Rango de presión	0 [psia] a 100 [psia]
Referencia de presión	Presión absoluta
Salida proporcional	5 [V], de 10 % a 90 %
Temperatura de operación	-40 [°C] a 125 [°C]
Rango de temperatura compensada⁶	-40 [°C] a 125 [°C]
Precisión	±0.25%
Tiempo de respuesta	menor a 2 [ms]

Tabla 4.2 Características transductor de presión Honeywell.



Figura 4.2. Transductor de presión absoluta.

En la figura 4.1 se puede observar que después del separador, en la vía del vapor, se encuentra instalada una placa orificio con sus respectivas bridas y en este caso se utilizó pero con el objetivo de medir el flujo de vapor. Conociendo la presión aguas arriba y aguas debajo de la placa orificio, además del diámetro de orificio, es posible estimar el flujo de vapor existente; gracias a que se utilizó un software de la compañía TVL la cual se especializa en el vapor. Se optó por esta alternativa debido a que se intentó calcular la cantidad de líquido que se evapora, a partir de la diferencia de la columna de líquido presente dentro del mezclador, es decir, se midió la altura antes y después de evaporar. Sin embargo, este proceso es muy poco exacto ya que durante el proceso de evaporación se derramaba bastante líquido, lo cual hizo impreciso el cálculo.

Los sensores utilizados en estos dos puntos también son transductores de presión pero de la marca Veris, a diferencia de los Honeywell, estos dispositivos son de referencia manométrica, es decir, están calibrados en función de la presión a nivel del mar. Por lo cual, se tuvo que medir exactamente la presión atmosférica presente en el laboratorio, esto se logró utilizando un barómetro de mercurio, se empleó una expresión que determina la densidad del mercurio en función de la temperatura. Conociendo la densidad, la altura de la columna de mercurio y la gravedad, se calculó el valor de la presión atmosférica local y como consecuencia se pudo calcular la presión absoluta en ambos puntos de la placa orificio.

⁶ Rango en el cual la temperatura no influye en el error de las mediciones.

$$\rho_m = 13.596 - 0.00246(T_a)^7 \quad (10)$$

Veris PG07AM	
Conexión	1/4" NPT
Rango de presión	de 0 [psig] a 100 [psig]
Referencia de presión	Presión manométrica
Salida	4-20 [mA]
Temperatura de operación	-40 [°C] a 85 [°C]
Rango de temperatura compensada	0 [°C] a 55 [°C]

Tabla 4.3 Características transductor de presión Veris



Figura 4.3 Transductor de presión manométrico

Estos dispositivos son más modestos que los de presión absoluta, además de que el rango de temperatura compensada es menor, es decir que hay más probabilidad de tener lecturas incorrectas fuera de ese rango, sin embargo es el material con el que se contó y en la interpretación de los resultados se consideraron todos estos factores.

4.1.2 Sensor de temperatura.

El dispositivo empleado fue un sensor de tipo resistivo, de la marca U.S. Sensor Corp., el principio de funcionamiento de este tipo de sensores se basa en la variación de la resistencia de un material respecto a la temperatura, en este caso se trata de platino; a mayor temperatura mayor será la resistencia.

De nuevo este sensor tiene las características apropiadas para las necesidades del sistema, el rango de temperatura del dispositivo es muy amplio y se adapta totalmente a las condiciones de operación. Además de que es muy preciso debido a la tolerancia promedio que tiene.

U.S. Sensor Corp. USW3577	
RTD	2000 [Ω]
Salida de tensión	Lineal
Configuración	4 hilos para mayor precisión
Tolerancia promedio	± 0.25 [°C]
Temperatura de operación	-50 [°C] a 180 [°C]

Tabla 4.4 Características sensor de presión.

4.1.3 Medidor de flujo.

El sensor utilizado fue un medidor de flujo rotativo, el cual consiste en un cuerpo de válvula de plástico, un rotor de agua y un sensor de efecto hall. Cuando el agua fluye a través del rotor, este gira y su velocidad cambia con diferentes flujos. El sensor de

⁷ W. H. Kirby, Temperature Sensitivity of Mercury-Manometer Bubble Gages.

efecto hall mide la correspondiente señal de pulso y la asocia con una determinada cantidad de flujo volumétrico.

Sensor de flujo rotativo RB-See-377	
Rango de velocidad de flujo	1-30 L/min
Pulso de flujo	$F(\text{Hz}) = (5.0 \cdot Q) \pm 3\%$ $Q = \text{L/Min}$
Capacidad de carga	$\leq 10\text{mA}$ (DC 5V)
Temperatura de operación	$\leq 80^\circ\text{C}$
Temperatura del líquido	$\leq 120^\circ\text{C}$
Humedad de operación	35% ~ 90%RH
Presión del líquido	$\leq 1.75\text{MPa}$

Tabla 4.5 Especificaciones medidor de flujo.



Figura 4.4 Medidor de flujo rotativo

4.2 Mediciones del sistema en funcionamiento.

A continuación se presentarán gráficos que muestran las lecturas hechas en varios eventos de experimentación que se realizaron, los datos que se seleccionaron son en los que se puede apreciar una tendencia similar, tanto en las condiciones del experimento, como en las lecturas. Antes de ello, es necesario aclarar diferentes aspectos inconvenientes que se tuvieron a lo largo de las sesiones de experimentación.

El primer aspecto y el más importante es la dificultad que se tuvo para recrear un estado estacionario, esto debido a diferentes factores, como la dificultad para mantener la temperatura del líquido dentro del calentador. A pesar de que se recirculó el líquido en el boiler, evidentemente este no fue diseñado para calentar el líquido instantáneamente ya que es de depósito, además de que tampoco se consideró dentro de su diseño presiones y temperaturas tan elevadas como en las condiciones del experimento. Una vez que se corría el sistema, la temperatura del líquido del calentador disminuía cerca de 20°C y ya no se recuperaba.

Otro aspecto fue la dificultad que se tuvo con las bombas, principalmente con la del fluido del ciclo, ya que en las primeras pruebas se observó una variación intermitente del flujo de trabajo. Se observó que el flujo aumentaba y disminuía intermitentemente. Al principio se asoció esta variación con la instalación de la bomba, por tal motivo se modificó la altura de la columna del líquido a la entrada de la misma, es decir el NPSH⁸ disponible. Una vez hecho eso, se observó una mejoría, sin embargo la intermitencia aún permanecía aunque en menor grado.

Por último, también se tuvo problemas respecto al mezclador, al no estar sellado herméticamente y debido a que el fluido aún se encuentra a alta temperatura al llegar al

⁸ Altura neta positiva en la aspiración, por sus siglas en inglés Net Positive Suction Head

recipiente, se formaba vapor el cual en determinado momento alcanzaba cierta presión que hacía levantar la tapa del mezclador.

Como se puede observar fueron varias dificultades las que se tuvieron, las cuales tuvieron impacto directo en las lecturas de las variables importantes en el sistema experimental. Sin embargo se obtuvieron resultados cualitativos favorables, los cuales serán presentados a continuación.

4.2.1 Medición de flujo de líquido.

A continuación se muestra una gráfica de diversas lecturas de flujo volumétrico que se tomaron con el medidor de flujo instalado en la posición que corresponde a la válvula de compuerta y con la bomba trabajando en su máxima velocidad.

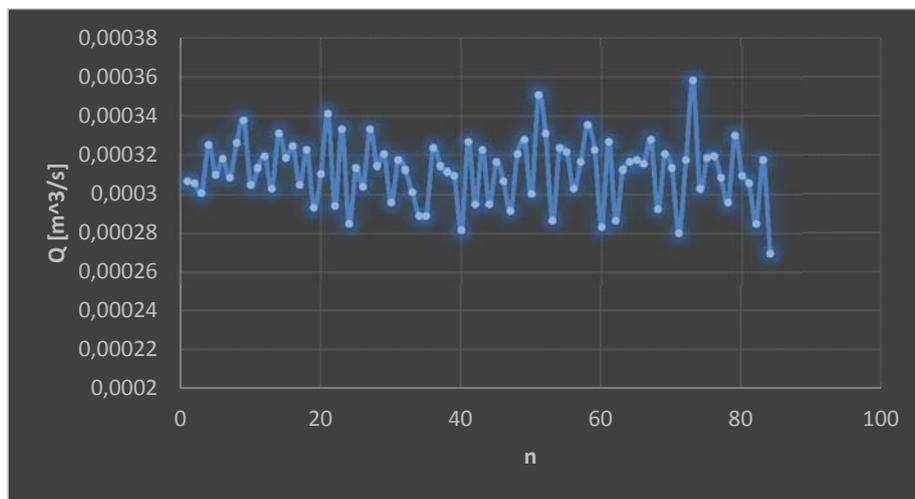


Figura 4.5 Lecturas de flujo volumétrico.

Una vez teniendo los datos se realizó el respectivo análisis para determinar el valor promedio del conjunto de valores que se tiene. De tal forma que se obtuvieron algunos parámetros asociados con la muestra de datos, tales como la media, varianza, desviación estándar y rango. Debido a que efectivamente la desviación estándar es muy pequeña, por lo tanto los valores no se alejan tanto de la media y es posible utilizar el promedio de los datos el cual es de $0.0003119 \text{ m}^3/\text{s}$.

Promedio	0.0003119 [m³/s]
Varianza	0.00000002675
Desviación estándar	0.00001635
Rango	0.0003584-0002696 [m ³ /s]
Diferencia	0.00000008 [m ³ /s]

Tabla 4.5 Parámetros estadísticos de datos de flujo.



4.2.2 Análisis de datos con la válvula de compuerta.

En este apartado se mostrará una selección de datos experimentales obtenidos en una sesión experimental, en donde se realizaron cinco eventos distintos de los cuales en solo tres de ellos el rango de temperatura es similar, esto se debe a lo que se mencionó anteriormente acerca de la dificultad para mantener la temperatura del fluido dentro del boiler constante, esto solo se pudo lograr por pocos minutos.

4.2.2.1 Válvula abierta 45°

Las siguientes gráficas muestran las lecturas tomadas para cada evento, solamente se mostraran las presiones y temperaturas antes y después de la válvula de compuerta abierta 45 grados. Para fines prácticos se le nombrará como puntos 1 y 2 antes y después de la válvula. El eje de las abscisas corresponde al número de lectura n y el eje de las ordenadas corresponde a la presión o temperatura según sea el caso. Es importante mencionar que se tomaron lecturas cada tres segundos, por lo tanto se puede apreciar que en efecto, el estado estacionario solo se puede lograr por pocos minutos.

Evento1.

	Presión [KPa]	Temperatura [°C]
Boiler	381.7053	119.1175
1	105.413	55.4846
2	74.9021	54.5714

Tabla 4.6 Condiciones iniciales evento 1

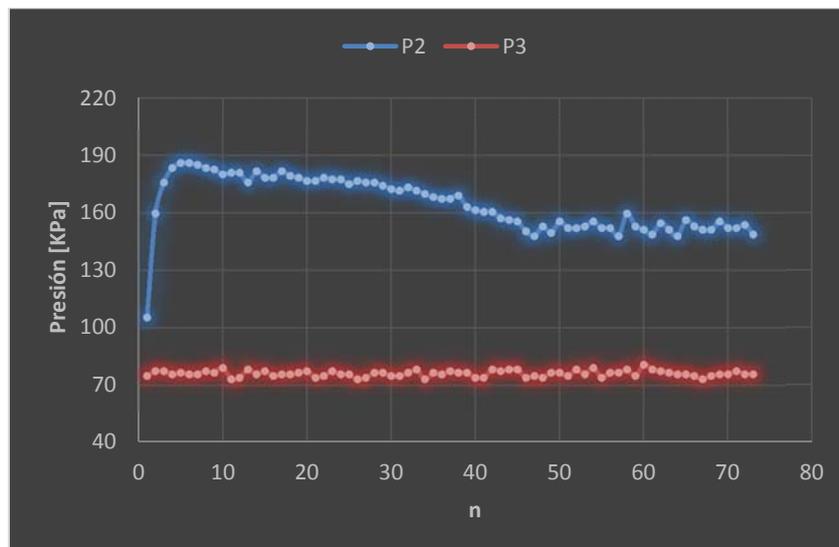


Figura 4.6 Gráfica de presión evento 1

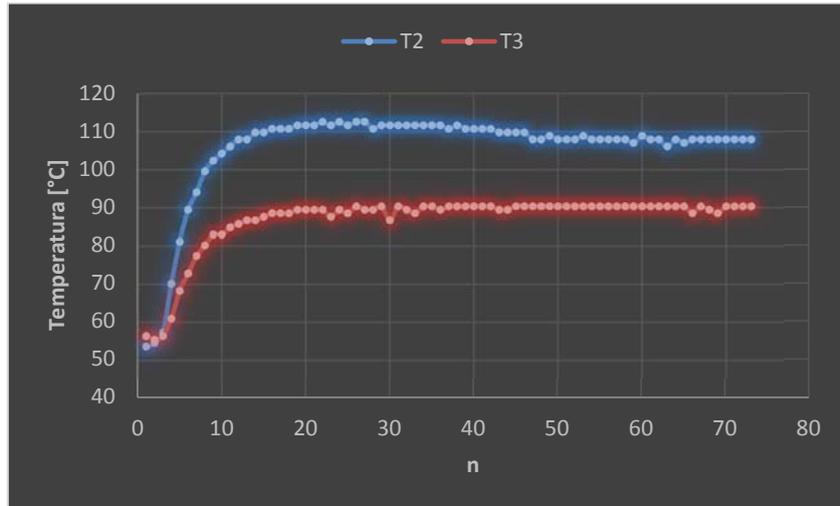


Figura 4.7 Gráfica de temperatura evento 1

Evento 2.

	Presión [KPa]	Temperatura [°C]
Boiler	355.5707	120.0488
1	143.5514	58.2259
2	74.9021	57.3119

Tabla 4.7 Condiciones iniciales evento 2.

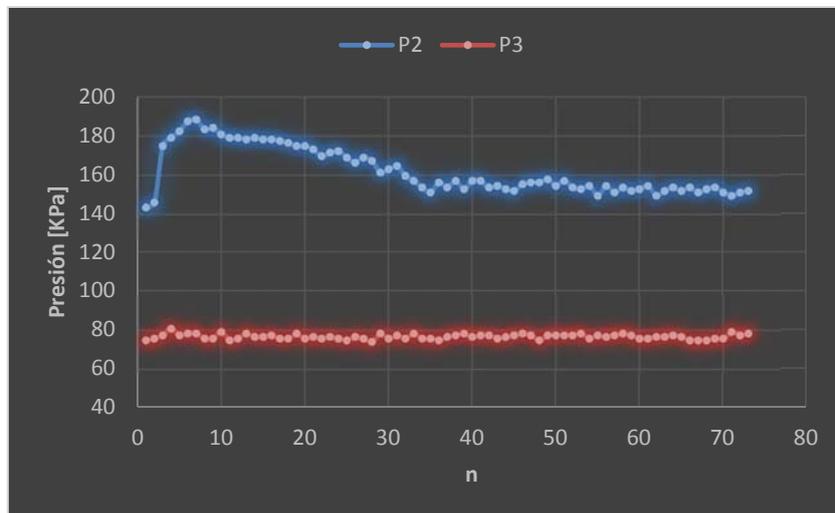


Figura 4.8 Gráfica de presión evento 2.

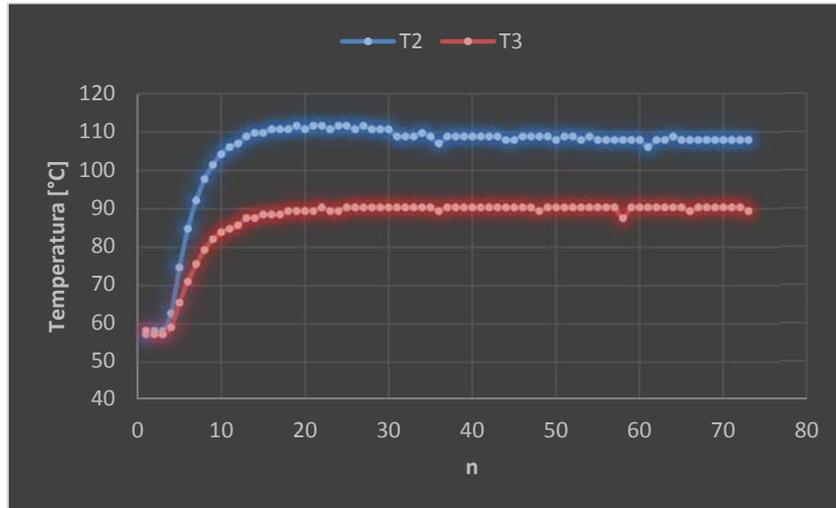


Figura 4.9 Gráfica de temperatura evento 2.

Evento 3.

	Presión [KPa]	Temperatura [°C]
Boiler	355.5707	119.1174
1	149.4841	60.9694
2	75.7497	59.1402

Tabla 4.8 Condiciones iniciales evento 3.

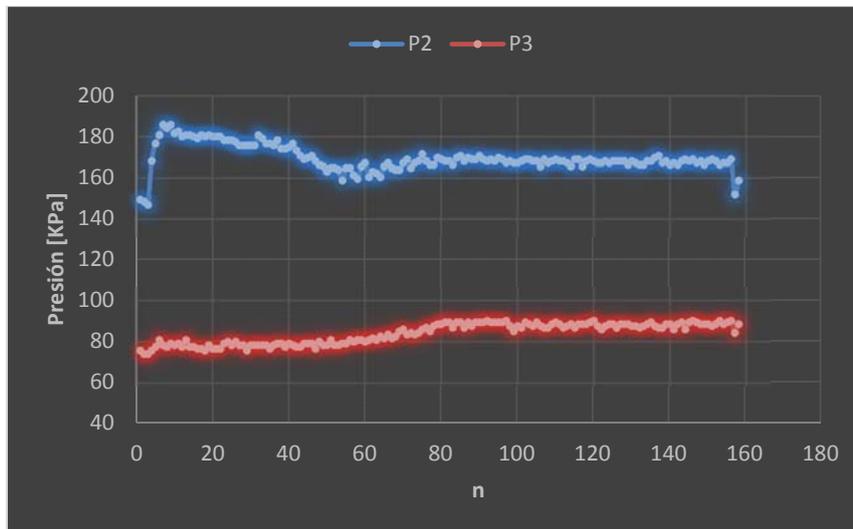


Figura 4.10 Gráfica de presión evento 3

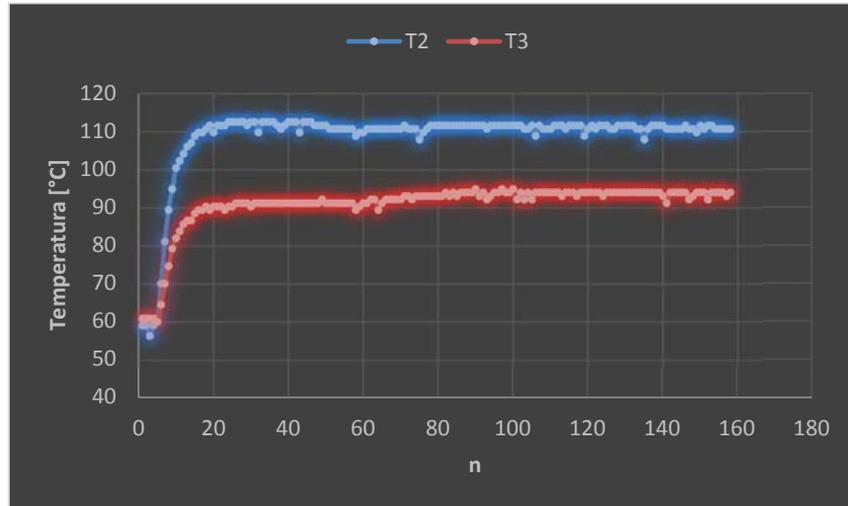


Figura 4.11 Gráfica de temperatura evento 3.

De las gráficas anteriores se puede apreciar un comportamiento similar para los 3 eventos, sin embargo el tercer evento difiere un poco de los primeros dos. Para los eventos 1 y 2 el estado estacionario comienza a partir de las lecturas número 50 y 40 respectivamente, según se puede apreciar en las gráficas. Si traducimos esto a tiempo, se puede afirmar que el sistema tarda aproximadamente dos minutos en alcanzar un estado estacionario, ya que las propiedades de presión y temperatura no varían significativamente en el tiempo.

El evento 3 difiere de los dos primeros ya que se puede observar que a pesar de que las condiciones iniciales en los tres eventos son similares, en el tercer evento la transferencia de calor ocurrió con mayor eficiencia ya que según los datos estadísticos que se observan en la tabla 4.12, la temperatura promedio en estado estacionario es mayor a la de los dos primeros eventos y por consecuencia, la presión también lo es.

	P1 [KPa]	P2 [KPa]	T1 [°C]	T2 [°C]	Pb [KPa]	Tb [°C]
Promedio	152.3527	76.3038	107.9264	90.1991	337.4060	116.5398
Varianza	7.2425	2.8147	0.2968	0.2633	3.6775	0.2203
Desviación estándar	2.6912	1.6777	0.5448	0.5131	1.9177	0.4694

Tabla 4.9 Parámetros estadísticos evento 1.

	P1 [KPa]	P2 [KPa]	T1 [°C]	T2 [°C]	Pb [KPa]	Tb [°C]
Promedio	153.3365	76.8540	108.2152	90.2088	329.2617	115.5077
Variación	4.6185	1.2400	0.3274	0.2815	21.1030	1.2454
Desviación estándar	2.1491	1.1136	0.5722	0.5305	4.5938	1.1160

Tabla 4.10 Parámetros estadísticos evento 2.



	P1 [KPa]	P2 [KPa]	T1 [°C]	T2 [°C]	Pb [KPa]	Tb [°C]
Promedio	167.7385	88.2452	111.2119	93.7985	333.8312	116.5041
Varianza	5.5013	1.5183	0.5032	0.4401	5.2996	0.6449
Desviación estándar	2.3455	1.2322	0.7093	0.6634	2.3021	0.8030

Tabla 4.11 Parámetros estadísticos evento 3.

Para obtener los parámetros de las tres tablas anteriores, únicamente se utilizaron los valores correspondientes al estado estacionario. Como se puede observar, en este caso también es válido trabajar con los valores promedio de cada propiedad, ya que en efecto, la desviación estándar es muy pequeña, lo cual quiere decir que los valores se dispersan muy poco respecto de la media, aproximadamente un 1.5 %. Es importante mencionar que en ninguno de los tres eventos se intentó alcanzar la temperatura de saturación antes de la válvula de compuerta, ya que como se mencionó en el capítulo dos, los fluidos en estado de saturación se encuentran en un estado de equilibrio metaestable, lo cual, aunque suene contradictorio, hace que el sistema sea muy inestable ya que se encuentra en un nivel muy alto de energía y existe la posibilidad que el fluido evapore dentro del intercambiador de calor.

4.2.2.2 Validación del modelo.

La forma en que se realizó la validación del modelo obtenido en el análisis teórico, es decir la ecuación 9, fue sustituyendo en la hoja de cálculo programada para el análisis de la válvula de compuerta, los valores promedio obtenidos del análisis de cada uno de los eventos, es decir, la presión y temperatura 1, así como el valor del flujo volumétrico.

Después se compararon los valores teóricos con los datos experimentales, asumiendo que estos datos son los reales, lo cual no es totalmente cierto ya que las mediciones tienen inherentemente errores, se calculó el porcentaje de error para cada evento.

Para el evento 1 se obtuvo la tabla 4.13, en la cual se puede observar que los porcentajes de error se tienen para la presión y temperatura obtenidos con el modelo teórico son de 5.04 y 3.7 por ciento, respectivamente. El valor de estos errores se puede considerar aceptable ya que es menor de 10 %.

La tabla comparativa correspondiente al evento 2, arroja valores muy similares a los del evento 1, errores del 5.58 y 4.06 por ciento los datos de presión y temperatura respectivamente. Finalmente para el evento 3, el error es más alto que en los casos anteriores pero aun así se mantiene dentro del rango que se considera aceptable, el cual es del 100%.

También se obtuvieron las curvas que muestran la calidad de vapor obtenida con la válvula de compuerta para distintas aberturas ya para cada uno de los eventos de experimentación. Los valores que se obtuvieron fueron muy similares, de 2.6, 2.66 y 2.4



por ciento respectivamente. Cabe mencionar que la calidad de vapor obtenida, según el modelo teórico, es debido a que como se mencionó anteriormente, en ninguno de los tres eventos se logró alcanzar la temperatura de saturación correspondiente a cada una de las presiones en cada evento.

	Teórico			Experimental	
	Estado 1	Estado 2	Error	Estado 1	Estado 2
Presión [KPa]	152.3527	80.1497	5.04%	152.3527	76.3038
Temperatura [°C]	107.9264	93.5358	3.70%	107.9264	90.1991

Tabla 4.12 Comparación de datos teóricos y experimentales evento 1.

	Teórico			Experimental	
	Estado 1	Estado 2	Error	Estado 1	Estado 2
Presión [KPa]	153.3365	81.1448	5.58%	153.3365	76.8540
Temperatura [°C]	108.2152	93.8684	4.06%	108.2152	90.2088

Tabla 4.13 Comparación de datos teóricos y experimentales evento 2.

	Teórico			Experimental	
	Estado 1	Estado 2	Error	Estado 1	Estado 2
Presión [KPa]	167.7385	95.7079	8.46%	167.7385	88.2452
Temperatura [°C]	111.2119	98.3842	4.89%	111.2119	93.7985

Tabla 4.14 Comparación de datos teóricos y experimentales evento 3.

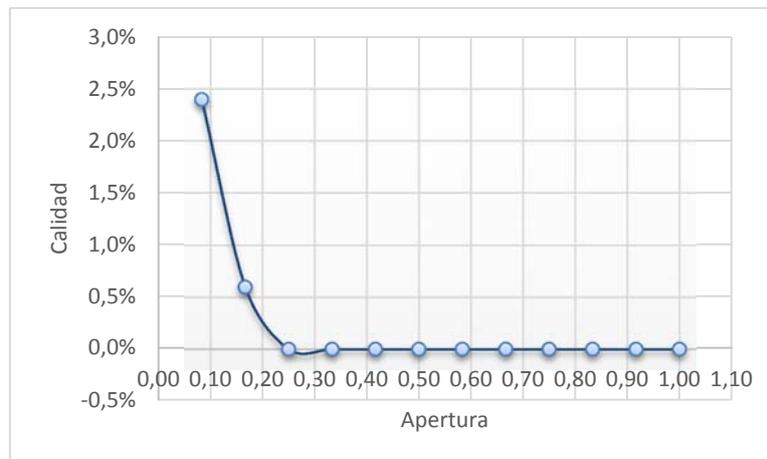


Figura 4.12 Curva de calidad teórica para el evento 1.

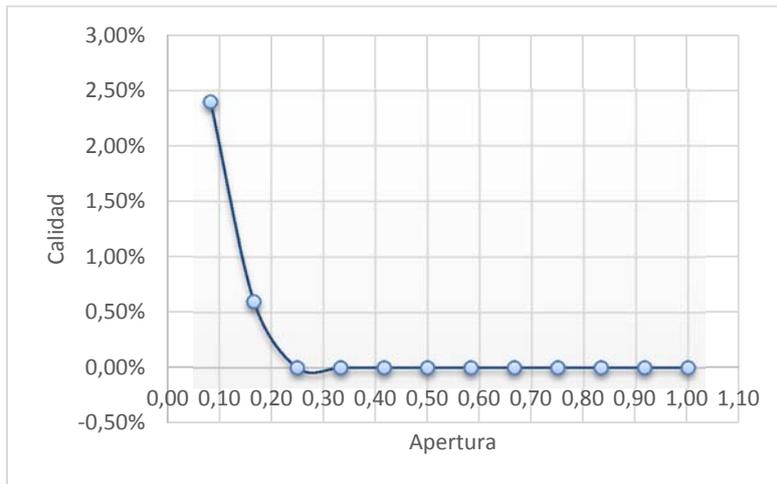


Figura 4.13 Curva de calidad del evento 2.

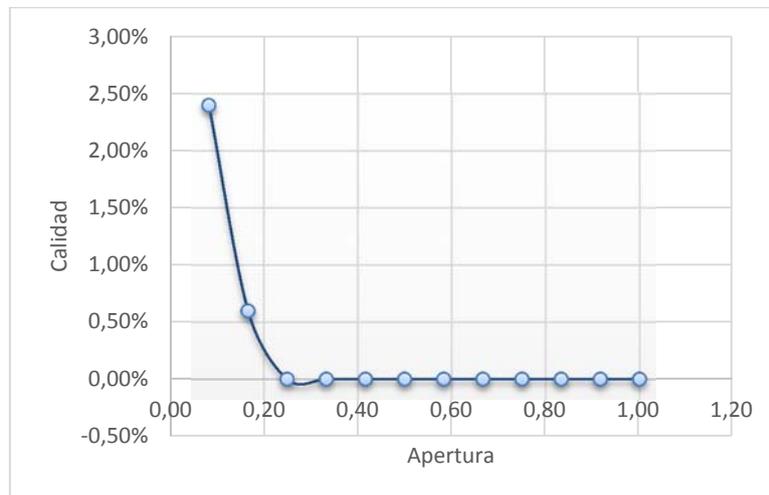


Figura 4.14 Curva de calidad del evento 3.

4.2.3 Medición de flujo de vapor.

Tal y como se mencionó anteriormente, para realizar la medición de vapor se utilizó una placa de orificio como medidor de flujo. Es importante mencionar que desde un principio se esperó que el valor obtenido sea solo uno aproximado, debido a diferentes factores:

- La placa de orificio no tiene acabados superficiales finos y tampoco el bisel que está implícito por norma.
- La instalación no se realizó conforme a la norma, la cual dice que el medidor de presión aguas arriba debe a una distancia de una vez el diámetro interno de la tubería y aguas abajo a una distancia de medio diámetro.
- El modelo que se ocupó para calcular el flujo de vapor a partir de la caída de presión medida, puede que no aplique para las condiciones que se tiene en el sistema experimental.

A continuación se muestra una gráfica de las lecturas de presión tomadas antes y después de la placa orificio, estas mediciones se hicieron con los transductores de presión manométricos.

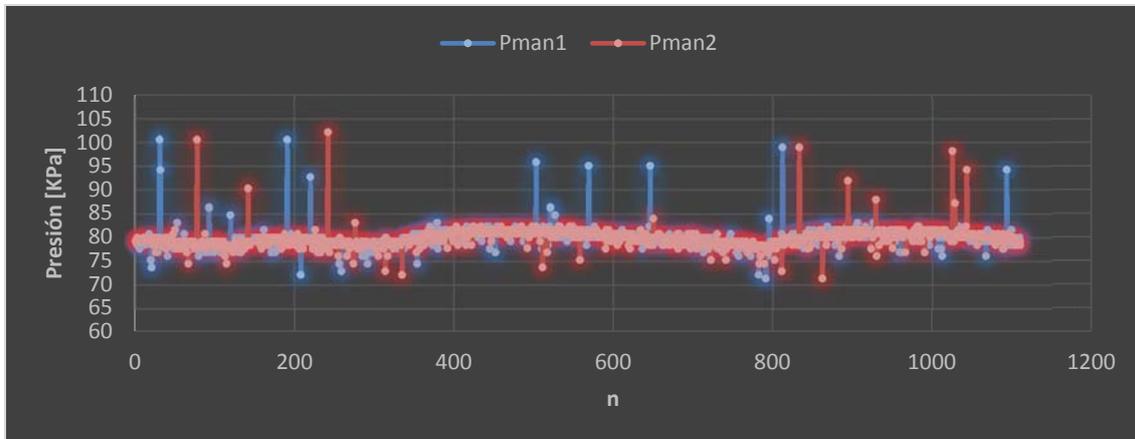


Figura 4.15 Mediciones de diferencia de presión en la placa de orificio.

Como se puede observar, la diferencia de presiones antes y después de la placa es muy poca, debido a que el flujo de vapor también lo es y por consecuencia los sensores de presión carecen de la resolución adecuada para medir los valores de presión.

De cualquier forma, se optó por realizar el análisis correspondiente, tomando los valores representativos de cada uno de los conjuntos de datos, es decir, el valor que más veces se repite tanto para la presión aguas arriba como la presión aguas abajo, los resultados fueron 80.8617 [KPa] y 79.3261 [KPa] respectivamente. Conociendo estos valores y el diámetro del orificio de la placa, el cual es de 6.35 mm, se utilizó un software calculador de la empresa TLV®. El valor de flujo que arrojó el calculador, fue de 3.03855 [Kg/h], lo cual si lo convertimos queda de 0.000844 [Kg/s].

4.2.4 Análisis de datos con placa orificio.

Para el caso de la placa de orificio se tuvieron diversas complicaciones ya que el Sistema Experimental de Generación de Vapor sufrió severos daños debido a las condiciones a las que se trabaja. En especial el sistema de instrumentación sufrió daños ya que en repetidas ocasiones se expuso a los microcontroladores al fluido caliente.

La bomba que se encarga de presurizar el fluido de trabajo sufrió daños irreversibles ya que se le solicitó trabajar en condiciones límite a las de diseño, es decir, la bomba está diseñada para trabajar a temperaturas máximo de 100 °C, por lo cual el tiempo de vida del dispositivo se redujo considerablemente. Por esta razón se decidió dejar el análisis experimental de la placa de orificio como trabajo a futuro, a pesar de contar con datos de pruebas realizadas.

CAPÍTULO 5

En este apartado se recapitulan aspectos generales del trabajo desarrollado, dichos aspectos servirán como justificación de algunos de los objetivos planteados al principio. Además se explica las razones por las cuales algunos de los objetivos se cumplieron parcialmente y las aportaciones futuras necesarias para completar la realización de los propósitos de trabajo.

5. CONCLUSIONES



5. CONCLUSIONES.

Se analizaron y comprendieron los diferentes procesos que comprenden el sistema del Ciclo Binario de Evaporación Instantánea. A partir de este análisis termodinámico se pudieron determinar las solicitaciones requeridas para el diseño del sistema experimental de generación de vapor, el cual tiene el propósito de recrear lo más real posible las condiciones de operación de una sección del CBEI.

Una vez teniendo el diseño del modelo experimental, se logró obtener las condiciones de entrada para la caracterización de ambos dispositivos. Para la válvula de compuerta se obtuvo un modelo que predice el coeficiente de pérdidas que se tiene, según la abertura de la compuerta. Posteriormente se determinó un modelo con el cual se obtiene la caída de presión generada para cada abertura de la válvula. Para el caso de la placa de orificio, se definió un modelo con el cual, proponiendo una relación entre el diámetro del orificio y el diámetro interno de la tubería, se puede obtener la dimensión del orificio para obtener la caída de presión solicitada. Con estos modelos se pudo definir completamente el estado termodinámico del fluido al pasar por cada uno de ellos. Se obtuvieron valores de presión, densidad, velocidad y calidad de vapor.

A partir de los datos numéricos obtenidos, se prosiguió a la etapa de diseño. Se planteó un diseño de bridas roscables para tubería de media pulgada, hechas de latón. También, se diseñó una placa orificio hecha de acero inoxidable. Para el caso de la válvula, se seleccionó una de la marca Rugo, también de latón e igualmente roscable para tubería de media pulgada.

Se realizaron experimentos primero probando la válvula de compuerta y trabajando con agua a alta temperatura, poco más de 100 °C y presiones promedio de 0.15 MPa. Se analizaron las muestras de datos que se obtuvieron a partir de un gran número de lecturas de presión, temperatura y flujo volumétrico de líquido caliente.

Una vez tenidos estos datos, se realizaron diferentes análisis gráficos y estadísticos. Se obtuvieron gráficas con resultados óptimos, sin embargo, para el caso del flujo de vapor, al no contar con un instrumento de medición adecuado, no fue posible obtener un valor de dicha cantidad y por consecuencia no se pudo conocer tampoco un valor exacto de calidad de vapor obtenida.

Aparentemente el hecho de no contar con una cantidad numérica de calidad de vapor, podría considerarse como un fracaso, sin embargo, cualitativamente se obtuvieron resultados positivos. Si se observan las gráficas de temperatura, correspondientes a los eventos 1 a 3, se puede observar que ante y después de la válvula existe una diferencia de temperatura cercana a los 20 °C, lo cual, únicamente nos dice que es ahí donde el fluido realmente cambia de fase. En otras palabras, ese cambio de calor sensible tan drástico en una sección tan corta, solo se puede explicar como un cambio de fase, ya



que el exceso de energía en forma de calor sensible, antes de la válvula, se utilizó como calor latente, el cual está relacionado directamente con el cambio de fase.

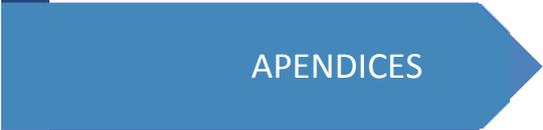
La selección del dispositivo más adecuado para operar en el ciclo, también queda inconclusa ya que como se mencionó anteriormente, se tuvieron diversas dificultades para continuar experimentando, ya que los equipos fueron sometidos a grandes solicitaciones, que salían de sus rangos de diseño, como las bombas, que funcionan a temperaturas máximas de 100 °C. Sin embargo, el análisis teórico y la caracterización de ambos dispositivos se concluyeron exitosamente y se observaron resultados muy similares. Los cuales se esperan validar experimentalmente como trabajo a futuro.

Otra conclusión muy importante que se logró, fue que el equilibrio es una abstracción, ya que como se pudo observar, el sistema experimental y en general todos los sistemas reales, nunca están estrictamente en equilibrio. Pero, siempre y cuando las variables que describen al sistema, en este caso presión y temperatura, no varíen apreciablemente en el transcurso de tiempo, se puede considerar que el sistema se encuentra en equilibrio, de tal forma que se le puedan aplicar las consideraciones termodinámicas pertinentes y obtener resultados muy aproximados a la realidad, que en este caso tuvieron un error del orden del 5%.

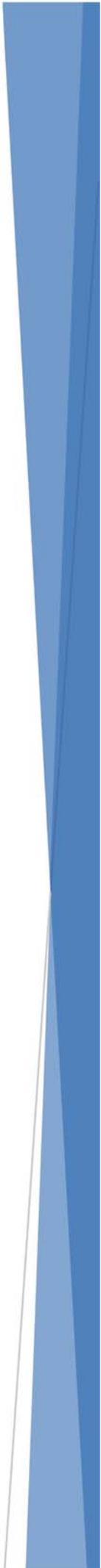
5.1 Trabajo a futuro.

Finalmente, y como trabajo a futuro, se propone la adquisición de un medidor de flujo ultrasónico para determinar apropiadamente la cantidad de masa que se evapora debido al estrangulamiento del flujo. De esta forma se logrará caracterizar completamente los modelos obtenidos a partir de la caracterización de los dispositivos.

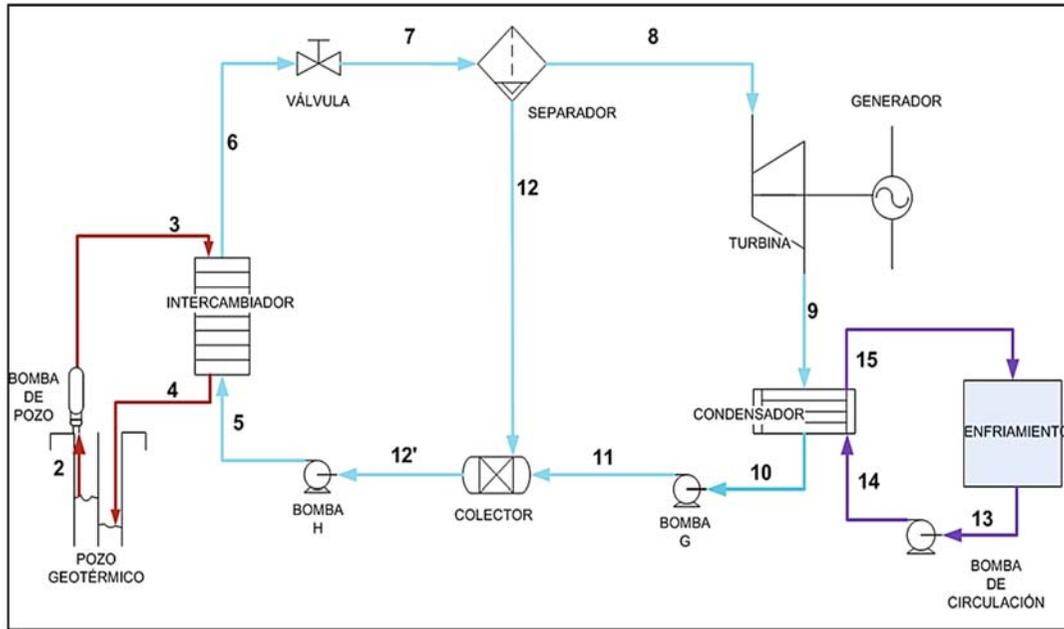
Por otra parte, se propone también el uso de bombas más sofisticadas que ofrezcan presiones y caudales que se aproximen más a las condiciones de operación del CBEI, también que estén fabricadas de materiales que soporten las solicitaciones establecidas por el CBEI.



APENDICES



Apéndice 1. Cálculos termodinámicos del CBEI

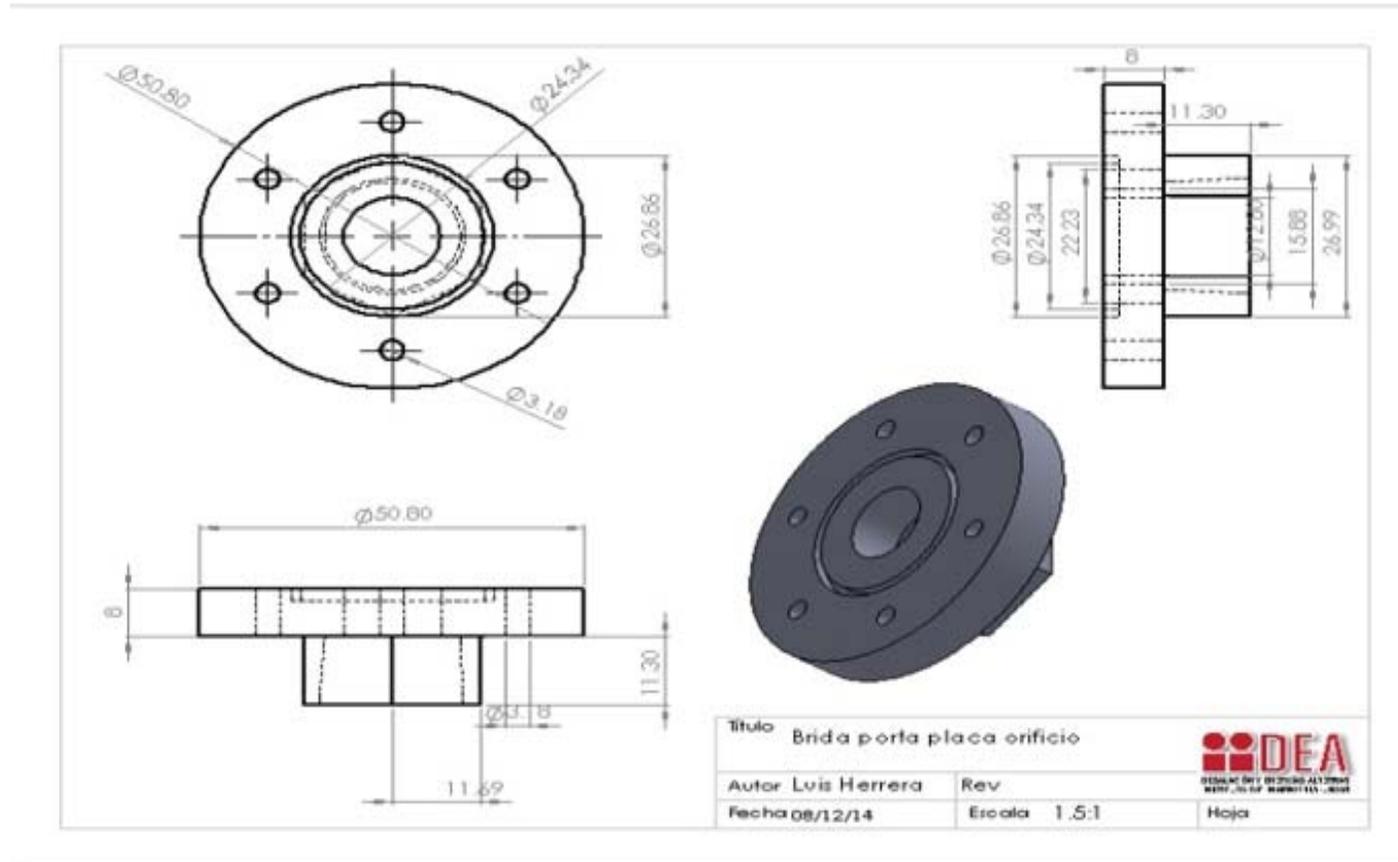


Datos de los Equipos	
Eficiencia bomba de pozo %	82
Eficiencia turbina %	50
Eficiencia intercambiador %	92
ΔP del intercambiador (bar)	1
Acercamiento de temp Inter $^{\circ}C$	4
Eficiencia bomba G %	82
Eficiencia bomba H %	82
Eficiencia Bomba de circulación %	82
Eficiencia del Condensador %	85

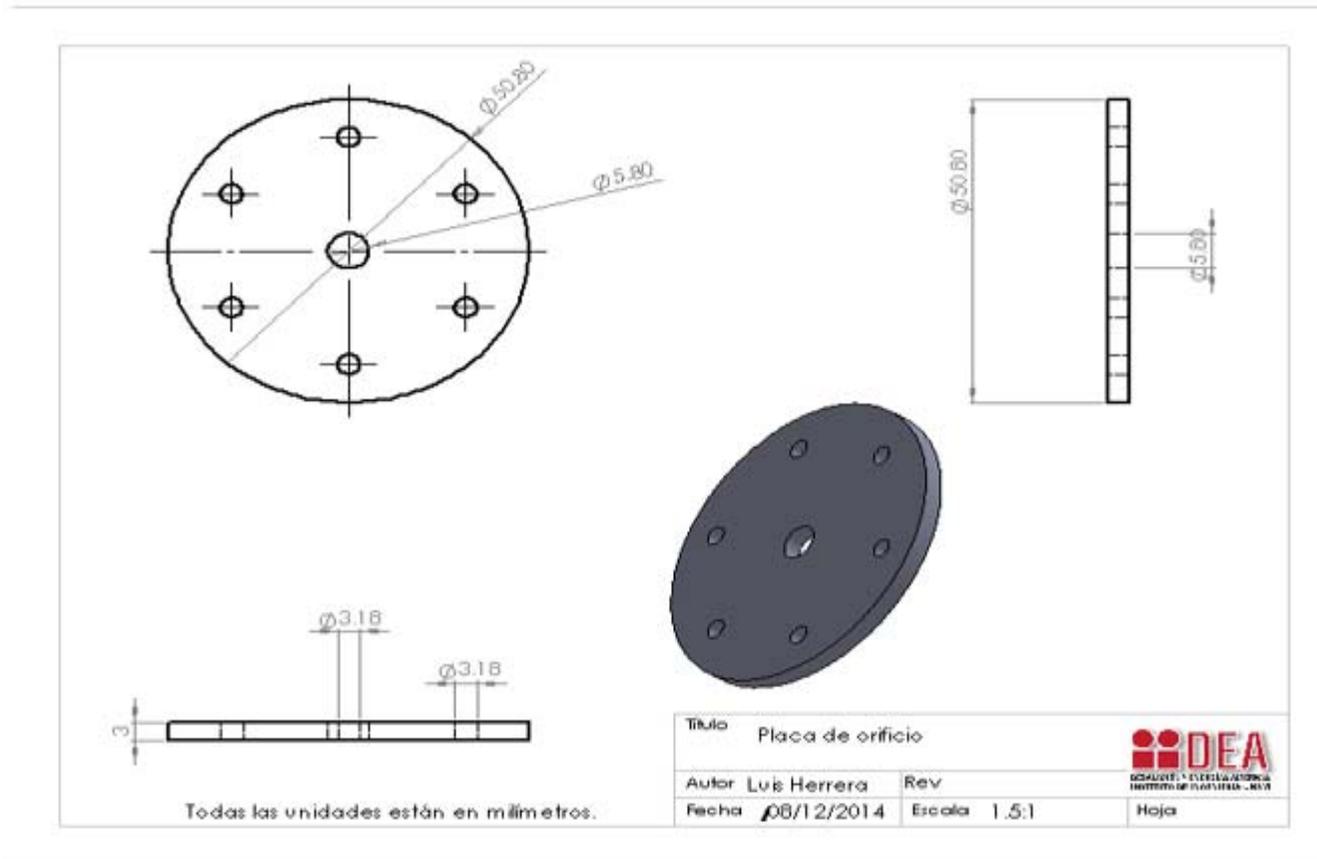


Punto	Recurso geotermico			Fluido de trabajo									Agua de enfriamiento			Ambiente
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12'	13	14	15	
T (°C)	140.0	140.0	107.8	103.8	136.0	107.1	107.1	45.8	45.8	45.8	107.1	103.8	31.6	31.6	41.6	25.0
P(MPa)	0.362	0.462	0.362	0.422	0.322	0.130	0.130	0.010	0.010	0.130	0.130	0.130	0.098	0.198	0.188	0.098
Gasto(Kg/s)	0.31	0.31	0.31	0.29	0.29	0.29	0.02	0.02	0.02	0.02	0.27	0.29	1.02	1.02	1.02	
Gasto(m3/s)	0.00033	0.00033	0.00033	0.00030	0.00031	0.02110	0.02082	0.22188	0.00002	0.00002	0.00028	0.00030	0.001	0.001	0.001	
Densidad(Kg/m3)	926.1	926.2	952.7	955.7	929.7	13.6	0.8	0.1	989.8	989.9	953.1	955.6	921.1	995.2	991.6	1.1426
Entalpia Liq(KJ/Kg)	589.2	589.3	452.3	435.4	572.0	'----	'----	2495.2	191.8	192.0	449.2	435.1	132.5	132.7	174.4	----
Entalpia Gas(KJ/Kg)	'----	'----	'----	'----	'----	'----	2687	'----	'----	'----	'----	'----	'----	'----	'----	105
Entalpia Mezcla (KJ/Kg)	'----	'----	'----	'----	'----	572.024	'----	2495.236	'----	'----	'----	'----	'----	'----	'----	----
Calidad(%)	0.000	'----	'----	'----	0.000	0.055	1.000	0.963	0.000	'----	0.000	0.000	'----	'----	'----	----
Entrop Liq(KJ/Kg)	1.739	1.739	1.394	1.350	1.698	1.387	1.387	0.649	0.649	0.649	1.387	1.350	0.4587985	'----	'----	----
Entrop Gas(KJ/Kg)	'----	'----	'----	'----	'----	7.271	7.271	'----	'----	'----	'----	'----	'----	'----	'----	0.367
Entrop Mezcla (KJ/Kg)	'----	'----	'----	'----	'----	1.710	'----	7.871	'----	'----	'----	'----	'----	'----	'----	----
Carga Térmica(KW)	'----	42.474	'----	'----	'----	'----	'----	'----	36.178	'----	'----	'----	'----	'----	42.43830486	----
Potencia Bomba(KW)	0.04	'----	'----	0.11	'----	'----	'----	'----	'----	2.32	'----	'----	0.12	'----	'----	----

APÉNDICE 2. Plano de bridas.



APÉNDICE 3.





Trabajos citados

- [1] «Asociación Geotérmica Mexicana,» [En línea]. Available: <http://www.geotermia.org.mx/geotermia/>. [Último acceso: 25 Abril 2014].
- [2] [En línea]. Available: <http://artehistoriaestudios.blogspot.mx>.
- [3] «International Geothermal Association,» [En línea]. Available: <http://www.geothermal-energy.org>. [Último acceso: 20 Marzo 2014].
- [4] H. C. H. Armstead, *Energía Geotérmica*, México DF: Limusa, 1989.
- [5] J. L. Q. León, *Manual de Geotermia*, 2007.
- [6] O. G. Jaimes, *Los recursos geotermicos de baja entalpía: Una opción en la generación eléctrica y la desalación de agua de mar*, México DF, Ciudad Universitaria: Universidad Nacional Autónoma de México, 2008.
- [7] M. B. Francisco, *Propuesta de diseño para la construcción de un condensador para un ciclo "PWG" de 1 kwe*, México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [8] r. DiPippo, *Geothermal Power Plants*, Dartmouth, Massachusetts, 2005.
- [9] L. A. F. Alcalá, *Generación eléctrica con el ciclo pressured water generation (PWG)*, México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [10] V. T. Rodríguez, *Geotermia en México*, Ciudad Universitaria: Universidad Nacional Autónoma de México, 1993.
- [11] S. d. Energía. [En línea]. Available: <http://www.sener.gob.mx>.
- [12] Q. Zhang y Q. Bi, «Experimental investigation on the rapid evaporation of high-pressure R113 liquid due to sudden depressurization,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, nº 61, pp. 646-653, 2013.
- [13] [En línea]. Available: <http://www.hisupplier.com>.
- [14] J. C. d. Gortari, *Fundamentos de transferencia de calor*, Distrito Federal: Ediciones Científicas Universitarias, 1999.



- [15] «ECOAGUA,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.ecoagua.com/>. [Último acceso: 16 junio 2014].
- [16] F. G. Martínez, Comparativa energética de sistemas técnicos de desalación con energía geotérmica de baja entalpía, México DF: Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [17] S. Helbig y S. J. Zarroukb, « Measuring two-phase flow in geothermal pipelines using sharp edge orifice plates,» *Geothermics*, n° 51, pp. 52-64, 2012.
- [18] «Spirax Sarco,» [En línea]. Available: <http://www.spiraxsarco.com>. [Último acceso: Diciembre 2014].
- [19] F. M. White, Fluid Mechanics, Rhode Island: McGraw Hill, 1990.
- [20] «Walworth Valves,» [En línea]. Available: <http://www.walworth.com/es>. [Último acceso: Mayo 2014].
- [21] C. G. Aranzeta, Introducción a la metodología experimental, México, D.F.: Limusa, 2001.
- [22] R. Hernández Sampieri, C. Fernandez Collado y P. Baptista Lucio, Metodología de la investigación, México D.F.: McGraw-Hill, 2010.
- [23] E. F. R. Zárate, Propuesta de diseño de un intercambiador de calor de placas para el ciclo PWG, Ciudad Universitaria: Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [24] C. E. CIANCAGLINI, «Hidrodinamia de la circulación vascular periférica normal y patológica,» *Revista de la Federación Argentina de Cardiología*, vol. 43, n° 1, 2014.
- [25] K. S. Doroteo, Diseño y construcción de un separador de flujos para un ciclo de generación geotermoeléctrica., Ciudad Universitaria: Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [26] P. N. S. d. C.V., Manual técnico de cobre..
- [27] «DudaDiesel,» [En línea]. Available: <http://www.dudadiesel.com>. [Último acceso: 09 Septiembre 2014].