

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA DE 15 MW EN LA ZONA DE CHACHIMBIRO, PROVINCIA DE IMBABURA, ECUADOR

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

JORGE LUIS ROSERO POLO

EDUARDO FRANCISCO SERRANO DÁVILA

DIRECTOR: ING. ERNESTO SORIA

CODIRECTOR: ING. RODRIGO CONTRERAS

Sangolquí, 2010-01-21

INDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
INDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.	x
ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA.	xviii
RESUMEN	I
1 CAPITULO: GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	3
1.3 Definición del problema	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo General.	5
1.4.2 Objetivos Específicos.	5
1.5 Alcance	6
2 CAPITULO : MARCO TEÓRICO	7
2.1 Sistemas Geotermales	7
2.1.1 Origen de los sistemas geotermales.	7
2.1.2 Los recursos geotérmicos	7
2.1.3 Clasificación	8
2.1.4 Flujo de calor y gradiente geotérmico.	9
2.2 Campos o yacimientos geotérmicos.	10
2.2.1 Clasificación.	10
2.2.2 Capacidad del yacimiento.	12
2.2.3 Producción y declinación de los yacimientos.	13
2.3 Metodología de Exploración.	14
2.3.1 Técnicas.	14
2.3.2 Recolección y Transporte de fluidos.	17
3 CAPITULO : MARCO CONCEPTUAL	31
3.1 Potencial de la energía de los fluidos geotérmicos	31
3.2 Generación de energía eléctrica a partir de energía geotérmica	33

3.3	Ciclos	34
3.3.1	Analogía ciclo Rankine con la geotermia.	34
3.3.2	Ciclo de vapor seco.	38
3.3.3	Ciclo de una sola y doble vaporización instantáneas	40
3.3.4	Ciclo de un fluido binario.	43
3.4	Eficiencia de las plantas geotérmicas.	44
3.5	Tratamientos del fluido geotérmico	48
3.5.1	Sobrecalentado	48
3.5.2	Solución de problemas de corrosión e incrustación.	49
3.6	Aspectos medioambientales	52
3.6.1	Generalidades	52
3.6.2	Ventajas y desventajas.	53
3.6.3	Reinyección.	55
3.6.4	Ecología	57
3.6.5	Situación medio ambiental en Chachimbiro	57
3.7	Aspectos sociales	60
3.7.1	Generalidades	60
3.7.2	Análisis social en la zona de influencia	61
3.8	Perspectivas al futuro	64
4	CAPITULO : FACTIBILIDAD OPERACIONAL	65
4.1	Características iniciales del proyecto.	65
4.1.1	Descripción.	65
4.1.2	Características del fluido.	66
4.1.3	Usos y propósitos de la planta de 15 Mw.	74
4.2	Análisis de los sistemas posibles para la central de Chachimbiro.	75
4.3	Selección de un sistema.	77
4.3.1	Esquema del sistema	79
4.3.2	Elementos que conforma el sistema.	79
5	CAPITULO: FACTIBILIDA TECNICA.	81
5.1	Turbina	81
5.1.1	Puntos generales del diseño de turbinas geotérmicas.	81
5.1.2	Balace energético	84
5.1.3	Selección y materiales.	95
5.1.4	Vida útil.	103

5.2	Separador de vapor.	104
5.2.1	Características	105
5.2.2	Balance energético	108
5.2.3	Selección y materiales.	110
5.2.4	Vida útil.	113
5.3	Condensador.	114
5.3.1	Características	115
5.3.2	Balance energético	117
5.3.3	Selección y materiales.	118
5.3.4	Vida útil.	122
5.4	Torre de enfriamiento	123
5.4.1	Características	123
5.4.2	Balance energético	124
5.4.3	Selección y materiales.	128
5.4.4	Vida útil.	132
5.5	Tuberías	133
5.5.1	Análisis de pérdidas.	133
5.5.2	Selección y materiales	136
5.5.3	Acoples y accesorios	143
5.6	Otros elementos.	152
5.6.1	Para gases no condensables.	152
5.6.2	Limpiadores de vapor.	155
5.6.3	Tanques de recolección.	157
5.6.4	Silenciadores.	157
5.6.5	Bombas.	159
5.6.6	Diámetro de pozos.	159
5.7	Aislamientos térmicos.	161
5.8	Balance energético del sistema seleccionado.	165
5.9	Análisis comparativo de los resultados obtenidos con un software básico y de fácil uso para cálculos experimentales de geotermia.	167
5.10	Perfil de Generación Eléctrica.	170
6	CAPITULO: FACTIBILIDAD ECONOMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN	173
6.1	Generalidades.	173
6.2	Evaluación Económica.	174

6.2.1	Costos de consumo para la generación de energía eléctrica a partir de la energía geotérmica.	174
6.2.2	Inversión inicial.	174
6.2.3	Costos directos e indirectos de generación.	176
6.2.4	Gastos generales	177
6.2.5	Producción de energía anual.	177
6.2.6	Costos de Producción Kwh en comparación con centrales de similares características.	178
6.3	Evaluación Financiera	179
6.3.1	El punto de equilibrio.	179
6.3.2	Balance económico-energético. (pérdidas y ganancias)	181
6.3.3	Índices de evaluación del proyecto.	182
6.4	Financiamiento.	182
7	CAPITULO: MANTENIMIENTO Y SEGURIDAD INDUSTRIAL.	183
7.1	Concepto y generalidades.	183
7.2	Mantenimiento de las plantas geotérmicas.	185
7.2.1	Descripción de un posible Plan de Mantenimiento para Chachimbiro.	186
7.2.2	Programación.	189
7.2.3	Control de mantenimiento.	190
7.3	Mantenimiento de los elementos constitutivos del sistema.	191
7.4	Seguridad en las centrales geotérmicas.	193
7.5	Factor de Planta anual.	195
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	197
9	ANEXOS	201
9.1	Memoria de cálculo (cajas negras) del ciclo de simple y doble flashing.	203
9.2	Memoria de cálculo del sistema seleccionado.	223
9.3	Esquema del sistema seleccionado	253
9.4	Hojas de datos	257
10	REFERENCIAS	261

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS

Figura 2.1. Tipos de Sistemas Geotérmicos	9
Figura 2.2 Estructura interna de la Tierra.	10
Figura 2.3. Distribución de los principales yacimientos geotérmicos.	12
Figura 2.4 Disposición esquemática de un equipo superficial con sus elementos principales par un pozo húmedo (mezcla vapor-agua).	18
Figura 2.5 Esquema de una bomba centrifuga.	18
Figura 2.6 Fotografía representativa de un par de tanques de recolección.	19
Figura 2.7 silenciadores para centrales geotérmicas.	19
Figura 2.8 Esquema de un limpiador de vapor, prototipo usado en Wairakei.	20
Figura 2.9 Esquema de un tipo de eyector usado en geotermia.	21
Figura 2.10 Esquema representativos de los acoples y accesorios de una tubería en una central geotérmica.	21
Figura 2.11 Esquema del funcionamiento de una turbina de vapor de agua.	22
Figura 2.12.a) Separador de vuelta en “U” b) Webre c) Disposición esquemática del separador de vapor – agua Cicloide.	24
Figura 2.13.a) Esquema de un condensador tipo chorro de contacto directo.b) Esquema de un condensador tipo barométrico de contacto directo, donde se muestra su funcionamiento y la estructura.	26
Figura 2.14.a) Esquema de una torre de enfriamiento de tiro natural. b) Esquema de una torre de enfriamiento de tiro forzado e inducido.	27

Figura 3.1 Formulas de James para la estimación de la capacidad de generación de potencia eléctrica de un pozo ya perforado.	33
Figura 3.2 Ciclo Rankine ideal y simple	35
Figura 3.3 Esquema del Ciclo Rankine mas real, simple y su representación en un diagrama entalpia –entropía; referencia	35
Figura 3.4 Esquema de una central eléctrica con ciclo de vapor seco.	39
Figura 3.5 Esquema de una central eléctrica con ciclo de simple vaporización instantánea (flash).	41
Figura 3.6 Esquema de una central eléctrica con ciclo de doble vaporización instantánea (flash).	42
Figura 3.7 Esquema de una central eléctrica con ciclo binario.	44
Figura 3.8 Grafica del proceso entalpia- entropía y Esquema del Ciclo Rankine más real, simple	46
Figura 3.9 Interpretación con y sin reinyección en el campo de Ahuachapán de El Salvador: Balances de energía del yacimiento para un campo de agua dominante. a) Vaporización de una etapa con reinyección; b) Vaporización de una etapa con desecho superficial del fluido.	56
Figura 4.1 Esquema general de una Central de doble flash con sus posibles elementos	79
Figura 5.1 Ubicación de la turbina dentro del esquema final. (Mayor detalle ver anexo 3).	81
Figura 5.2 Representación del proceso de expansión del vapor en una turbina de contrapresión sobre un diagrama entalpia-entropía.	84
Figura 5.3 Representación del proceso de expansión del vapor en una turbina de condensación sobre un diagrama entalpía-entropía.	87

Figura 5.4 Representación del proceso de expansión del vapor en una turbina de condensación con extracción intermedia sobre un diagrama entalpía-entropía.	90
Figura 5.5 Estadística de cómo se han repartido el mercado de las centrales geotérmicas hasta el año 1997 las diferentes empresas.	99
Figura 5.6 Ejemplo de turbinas modulares.	99
Figura 5.7 Ubicación de los separadores dentro del esquema final. (Mayor detalle ver anexo 3).	104
Figura 5.8 Disposición esquemática del separador de vapor – agua Cicloide.	108
Figura 5.9 a) especificaciones para el diseño de un separador cicloide. b) especificaciones para el diseño de un separador cicloide.	111
Figura 5.10 Ubicación del condensador dentro del esquema final. (Mayor detalle ver anexo 3).	114
Figura 5.11 Esquema de un condensador tipo chorro de contacto directo, donde se muestra su funcionamiento y la estructura.	115
Figura 5.12 Esquema de un condensador tipo barométrico de contacto directo, donde se muestra su funcionamiento y la estructura.	116
Figura 5.13 Representa esquemáticamente los puntos usados para encontrar El calor disipado en el condensador dentro de un sistema geotérmico básico de doble flashing	117
Figura 5.14 Diferentes arreglos de condensadores de chorro y turbinas geotérmicas.	119
Figura 5.15 Ubicación de la torre de enfriamiento dentro del esquema final. (Mayor detalle ver anexo 3).	123

Figura 5.16 Representa esquemáticamente los puntos usados para encontrar El calor absorbido por el agua que viene desde la torre de enfriamiento dentro de un sistema geotérmico básico de doble flashing.	124
Figura 5.17 Representación sobre un diagrama psicrométrico, de la evaluación de aire húmedo al atravesar la torre de refrigeración.	126
Figura 5.18, Esquema de la analogía eléctrica de la transferencia de calor en un tubo con aislamiento térmico mediante la convección y conducción.	134
Figura 5.19, ejemplo de instalación de tuberías para geotermia.	139
Figura 5.20 representación ilustrada del coste de la conducción de agua cliente en función de la velocidad de circulación del agua	140
Figura 5.21 representación esquemática de las válvulas que se usan en una línea de vapor	151
Figura 5.22 Diagrama de un lavador de vapor de baja presión similar a los empleados en Wairakei.	155
Figura 5.23 silenciadores para centrales geotérmicas.	158
Figura 5.24 Representación ilustrativa de la variación del coste de la conducción de agua caliente en función del espesor del aislante.	163
Figura 5.25. Esquema general de Proceso (Para mayor detalle ver anexo 3)	165
Figura 5.26, En esta figura se representa un central de vapor de doble separación instantánea por medio de un software.	168
Figura5. 27, Variación de la potencia generada dependiendo de la calidad del fluido.	170
Figura 5.28, Variación de la potencia generada dependiendo de la calidad del fluido.	170

Figura 5.29, Variación de la potencia generada dependiendo del caudal del fluido geotérmico.	171
Figura 5.30, Variación de la potencia generada dependiendo del caudal del fluido geotérmico.	171
Figura 6.1. Determinación del punto de equilibrio.	180
Figura del anexo 2 Utilizada para encontrar la eficiencia del sistema	236
Figura del anexo 2 Representación del ciclo escogido en una grafica h-s	237

TABLAS

Tabla 3.1. Crecimiento de la explotación de los recursos geotérmicos en los países de Centro América	31
Tabla 3.2 Porcentaje equivalente de lo que representa la producción de energía eléctrica por medio de la geotermia del total de producción de energía en cada país por diferentes métodos.	32
Tabla3.3 Potencial Geotérmico del Ecuador	33
Tabla 3.4 Principales sustancias corrosivas o incrustantes presentes en las aguas termales.	52
Tabla 4.1 Potencial geotérmico de Chachimbiro	66
Tabla 4.2 Características principales de los fluidos para un recurso con líquido dominante según algunos autores de libros referentes a la geotermia.	67
Tabla 4.3 Características de los fluidos en las distintas centrales geotérmicas, las cuales son similares a las que se cree obtener en Chachimbiro.	69
Tabla 4.4 Características del fluido de Chachimbiro (Posibles con criterio conservador)	71
Tabla 4.5 Selección de Sistema	75

Tabla 4.6 Comparaciones entre los dos sistemas	78
Tabla 4.6 Principales elementos que conforman una Central Geotérmica con un proceso de doble flash	80
Tabla 5.1 Comparación de resultados entre los sistemas de turbinas estudiados mediante balance energético. (Cajas Negras).	93
Tabla 5.2 resumen de características, ventajas y otros de fabricantes de turbinas geotérmicas.	96
Tabla 5.3 Características de las turbinas utilizadas en las distintas centrales geotérmicas.	99
Tabla. 5.4 Materiales típicos de los elementos de la turbina	102
Tabla 5.5 Selección del separador	106
Tabla 5.6 Parámetros de diseño de un separador cicloide y del removedor de partículas.	112
Tabla 5.7 Materiales, rangos de presión, tamaños y tipo de conexiones de separadores	113
Tabla 5.8 Caudales de extracción, al condensador, requerido para enfriar; temperatura a la salida y potencia térmica extraída por el condensador usando las características del ejemplo numérico de la caja negra de la turbina con condensación y extracción intermedia (ver seccion5.1.2.c).	117
Tabla 5.9 El caudal de agua necesario para refrigerar que va desde la torre e ingresa al condensador, usando las mismas característica del ejemplo de la sección 5.1.2.c y con los resultados obtenidos en el ejemplo explicativo del condensador tabla 5.12.	126
Tabla 5.10 Selección de la torre de enfriamiento	129
Tabla 5.11 Principales materiales utilizados en las torres de enfriamiento.	131

Tabla 5.12 de los plásticos para ser usados en torres de enfriamiento	132
Tabla 5.13 tabla con los valores aproximados de los rangos de pérdidas de temperatura en una tuberías aislada y o aislada	133
Tabla 5.14 tabla comparativa de los diferentes materiales usados en tuberías para la geotermia.	140
Tabla 5.15 tabla comparativa de las diferentes juntas usadas en las instalaciones de transporte de agua caliente y vapor de una central geotérmica	143
Tabla 5.16 Selección de empaaduras	147
Tabla 5.17 Selección de Bridas	148
Tabla 5.18 Selección de Válvulas.	150
Tabla 5.19 Selección del equipo para tratar los gases no condensables	152
Tabla 5.20 Se muestra una orientativa de selección del eyector	154
Tabla 5.21 Comparación de los diferentes sistemas que usan en las centrales geotérmicas para la extracción de gases no condensables. Este sistema lo hacen los mismos fabricantes de las turbinas.	154
Tabla 5.22 Guía para tamaños óptimos de pozos	160
Tabla 5.23 Resultados del proceso	166
Tabla 5.24 Comparación entre el programa y los cálculos manuales.	169
Tabla 6.1 Valores de inversión inicial	174
Tabla 6.2 Detalle de la inversión en el área de la central de producción.	175
Tabla 6.3 Costos de los principales elementos de la central geotérmica	175
Tabla 6.4 Costos directos e indirectos anuales	176
Tabla 6.5 Gastos generales	177

Tabla 6.6 Producción anual de energía	177
Tabla 6.7 Costo aproximado de un Kwh de energía eléctrica producida por otras fuentes de energía.	178
Tabla 6.8 Costo aproximado de un Kwh de energía eléctrica producida por geotermia de este proyecto	179
Tabla 6.9 Costos Fijos y variables	179
Tabla 6.10 Punto de equilibrio	180
Tabla 6.11 Balance económico-flujo de caja (pérdidas y ganancias)	181
Tabla 6.12 Índices de evaluación del proyecto.	182
Tabla 7.1 Letras de identificación	188
Tabla 7.2. Planificación de Mantenimiento Preventivo mes de Febrero, planta Orzunil	190
Tabla 7.3. Mantenimiento de elementos constitutivos del sistema	191
Tabla 7.4. Mantenimiento de otros elementos del sistema	192
Tabla 7.5. Factores de planta en plantas geotérmicas	195
Tabla del anexo2 Valores de entalpías, entropías, caudal y titulación en cada uno de los puntos del esquema seleccionado	237
Tabla del anexo2 Valores de los diámetros de tubería estimados del esquema seleccionado	238
Tabla del anexo2 Valores de los espesores de tubería estimados del esquema seleccionado	239
Tabla del anexo2 Valores de caída de presión en las tuberías estimadas del esquema seleccionado	240

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

ABREVIATURAS

CAPITULO 1

AIEA, Agencia Internacional de Energía Atómica.

CIÉ, Corporación para la Investigación Energética.

ESPE, Escuela Politécnica del Ejército.

EUA, Estados Unidos de Norteamérica.

IAEA, Organismo Internacional de Energía Atómica.

INECEL Instituto Ecuatoriano de Electrificación.

SENACYT, Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología.

CAPITULO 2

bar abs, bares absolutos, para presión.

EEUU, Estados Unidos de Norteamérica.

HPC, Hydrothermal Power Company.

CAPITULO 3

IGA, Institution Geothermal of America.

INEC, Instituto Nacional de Estadísticas y Cencos

MEM, Mercado Eléctrico Mayorista

NA, no habilitado, o sin valor

ONGs, organizaciones no gubernamentales

R-114, refrigerante hecho en laboratorio en base al petróleo.

SI, Sistema Internacional de Unidades

CAPITULO 4

FEC, Facultad De Electrotecnia y computación de Nicaragua.

OIEA, Organismo Internacional de Energía Atómica

UPME, Unidad de planeación minero energética.

CAPITULO 5

ASME, American Society Of Mechanical Engineers

ASTM, American Society for Testing and Materials

CAPITULO 6

BID, banco interamericano de desarrollo.

PRR, periodo real de recuperación en años.

TIR, TASA INTERNA DE RETORNO

VAN, valor actual neto

CAPITULO 7

ANSI, American National Standards Institute

ISA, Sociedad americana de Instrumentación

SIMBOLOGÍA

III, tres en romanos.

XXI, siglo veinte y uno.

A, es la cantidad de adición de material por efectos de la corrosión y erosión dentro de las tuberías.

bar, presión

BA, bomba centrífuga para envío del binario.

BC, bomba centrífuga para envío del condensado a la torre de enfriamiento.

BT, bomba centrífuga para envío de la torre de enfriamiento al condensador.

CE, condensador secundario.

CF, cámara de flashing (cicloide)

CF1, cámara de flashing (cicloide)

CF2, cámara de flashing (cicloide)

CO₂, dióxido de carbono.

COX, monóxido de carbono

C_{pr} Calor específico del mismo kJ/kg C

CP, condensador principal.

C/Km, pérdida de temperatura por kilometro

Do, es el diámetro exterior del tubo.

Di, es el diámetro interior del tubo.

E, eyector de gases no condensables.

F es la mezcla liquido vapor de agua.

GE, generador de electricidad.

Gwh, gigavatios-hora.

H₂S ácido sulfhídrico

h, son las entalpias del fluido a diferentes temperaturas en cada punto y esta dado en KJ/kg.

h_e , energía interna específica del fluido de trabajo

h_s , entropía específica del fluido de trabajo

Kcal/kg , Entalpía

kg/cm² presión

kg/kwh, consumo neto de kg de vapor por kilovatio hora producido.

kg/s,caudal

kJ/kg Entalpía

kJ/kg K, entropía

Km, kilómetros

km², kilómetros cuadrados

kV, kilovoltios

kW, kilovatios

lb/pulg², presión.

L fase liquido del fluido.

m, metros.

m².°K/W, resistencia térmica

m/s, velocidad

MW, megavatio

MWe, Megavatios eléctricos, son los que se obtiene al final de los bornes del generador.

NOx, monóxido de nitrógeno.

pH, grado de acides de una sustancia.

P, es la presión de diseño.

$P_{e,aux}$, es la potencia eléctrica consumida en equipos auxiliares como bombeo de agua caliente (Q_c), iluminación, sistema de control, etc. viene dado en kWh

$P_{e,b}$, es la potencia eléctrica requerida o gastada por las bombas para hacer circular el agua de enfriamiento. Viene dado en kWh

$P_{e,g}$, es la potencia eléctrica generada en los bornes del generador. Viene dado en kWh

$P_{e,net}$, es la potencia eléctrica neta generada. Viene dado en kWh

PI, pozo de reinyección

$P_{e,r}$, es la potencia eléctrica requerida o gastada por los ventiladores si se tiene una torre de enfriamiento de tiro forzado. Viene dado en kWh

Pmax, Potencia eléctrica máxima generada. Viene dado en kWh

Pmin, Potencia eléctrica mínima generada. Viene dado en kWh

PP, pozo productor.

$P_{t,c}$, es la potencia cedida o dada al fluido para calentarse por medio de una caldera, en el caso de la geotermia es por medio del calor del suelo en el yacimiento. kWt

q_{in} , calor que ingresa al sistema.

q_{on} , Calor que sede o da el sistema.

Q , es el caudal del fluido dado en kg/s

Q_r , es el caudal del fluido refrigerador dado en kg/s

S, silenciador.

SH, separador de humedad.

SP, separador de partículas.

t es el mínimo espesor requerido de pared.

t/h ,caudal

T , temperatura absoluta

Subíndice i , condiciones a la boca del pozo

Subíndice o , condiciones del condensador o sumidero térmico

tCO_2/MWh factor de reducción de toneladas de CO_2 por año de producción de megavatios en base a termoeléctricas.

TR, torre de enfriamiento de tiro forzado.

TV, turbina de vapor.

v_r es el volumen específico del fluido refrigerante dado en m^3/kg .

V fase las fase vapor.

VCS, válvulas de control.

VP, válvula principal de compuerta.

VR, válvulas de retención.

w , Trabajo generado

w^* , Trabajo isoentrópico.

$W_{\text{pump in}}$, es el trabajo generado por la bomba.

$W_{\text{turbine out}}$, es el trabajo dado por la turbina.

W/m^2 , flujo de calor

x , para la titulación de la mezcla.

X la composición del compuesto más volátil en fase vapor.

y , es la tasa de extracción del vapor

Y la composición del compuesto más volátil en fase líquida.

$^{\circ}\text{C}$, grado centígrado

$^{\circ}\text{C}/\text{km}$, gradiente geotérmico

$<$, menor que

$>$, mayor que

$\%$, porcentaje

'' Hg, pulgadas de mercurio, para presión.

E , es el factor de eficiencia en la soldadura.

η_b es la eficiencia del grupo motobomba.

$\eta_{b,r}$ es la eficiencia del grupo motobomba o del ventilador de refrigeración.

η_t , eficiencia térmica.

η_{bruto} , Rendimiento bruto de un sistema cerrado del ciclo Rankine.

η_e , Rendimiento eléctrico del generador.

η_i , Rendimiento interno de la turbina.

η_m , Rendimiento mecánico de la turbina.

S, es el esfuerzo máximo generado por la presión interna el tubo.

y , es un coeficiente que representa la composición química en los materiales.

Δp_r Es la diferencia de presión entre bocas de aspiración e impulsión.

Δp Es la diferencia de presión entre bocas de aspiración e impulsión.

RESUMEN EJECUTIVO

INTRODUCCIÓN

El Ecuador a través de los años ha venido afrontando un problema energético no por falta de recursos naturales como gas natural, geotérmicos, hidráulicos, o los llamados recursos renovables, si no, por la falta de acción y decisión de los gobiernos para solucionarlo. En Latinoamérica la mayoría de sus países han invertido en la investigación y el desarrollo de las alternativas energéticas en base a recursos renovables, lo contrario al Ecuador que se ha destacado por siempre depender de unas pocas fuentes de energía que como se sabe en la actualidad en épocas de estiaje ocasionan grandes problemas de producción de energía eléctrica, que a su vez es fuente primordial para el sistema productivo del país. En el gobierno actual se ha querido cambiar esta situación en base a nuevos proyectos, unos ya ejecutados, otros en fase de desarrollo y unos últimos en vía de estudio e investigación. La Escuela Politécnica Del Ejército como parte de su misión y por medio de concurso se hace cargo de un proyecto llamado “Investigación para la utilización de la Energía Geotérmica en Chachimbiro - Imbabura”, el cual busca justamente cambiar la matriz energética y sustituir el uso de combustibles derivados del petróleo. En este camino que lo hemos vivido día a día donde no solo el problema energético hace mella en el desarrollo del pueblo sino, la falta de empleo, la falta de servicios básicos y el alto costo de la vida en el Ecuador hacen que nosotros como ingenieros y personas parte de una sociedad en proceso de desarrollo busquemos alternativas para solventar estos problemas que están a lo largo y ancho del país, y tomando como ejemplo esta Chachimbiro, donde se encuentra un recurso geotérmico no explotado que puede ser una de las soluciones para el desarrollo de este pueblo y en futuro de la provincia.

METODOLOGIA

En el estudio básico de Factibilidad para la implementación de una Central Geotérmica de 15 MW en la zona de Chachimbiro, el método al iniciarse el proyecto fue de carácter científico, en base a una investigación exploratoria ya que

el tema elegido ha sido poco explorado y reconocido, también porque sobre él es difícil formular hipótesis precisas o de ciertas generalidades. A parte es un nuevo fenómeno, que precisamente por su novedad, no admite todavía una descripción sistemática, y por último los recursos que disponemos como investigadores son insuficientes como para emprender un trabajo más profundo. Dentro del mismo se involucran parámetros técnicos y económicos donde se sustenten los principios de este proyecto y afines.

Como complemento se utilizó el método deductivo, para de datos generales aceptados como validos llegar a una conclusión de tipo particular como es la factibilidad operativa, técnica y económica de los equipos y materiales que intervienen en el funcionamiento de un sistema escogido para una central geotérmica obteniendo resultados eficientes y lo más apegados a la realidad sin descuidar el impacto social y medio ambiental en la zona de influencia.

RESULTADOS

Además de presentan resultados cualitativos, se presentan resultados cuantitativos aproximados como: costos referenciales y un perfil de Generación Eléctrica con un rango de hasta 30 MW en condiciones conservadoras. Para llegar a estos resultados de carácter teóricos, se baso el estudio en la información recogida y analizada, la cual es por medio de la experimentación en centrales geotérmicas en uso con características de suelo similares a las que se tiene en Chachimbiro y a la encontrada en los libros especializados en geotermia, ya que no se posee en la actualidad características reales del fluido.

En este trabajo usamos un ciclo de doble vaporización instantánea, con separadores ciclónicos, un sistema de turbina con alta (7.5 bar absolutos) y baja presión(1.5 bar absolutos), un condensador de chorro de contacto directo (temperatura de trabajo 40⁰C o 0.074 bar absolutos de presión) y una torre de enfriamiento de tiro forzado, tres pozos de producción y uno reinyección, obteniendo una producción de energía a su máxima potencia de 17 MW y una mínima de 5 MW, con una eficiencia del 6.8%,por medio de un caudal de 180 kg/s

CONCLUSIONES:

Este estudio constituye la pauta para futuros proyectos con energía geotérmica a desarrollarse en la zona de Chachimbiro y deja una fuente de información básica no existente en el Ecuador, de carácter ingenieril e innovador al problema ya descrito compartiendo nuestra formación profesional para que el Estado y los ciudadanos se interesen más en la energía geotérmica y sus utilidades y en un futuro cercano se pueda dar su aplicación y construcción de dicha planta.

Es importante recalcar que el objetivo de este estudio no es demostrar la factibilidad real del proyecto, sino, lo más sobresaliente de dicho estudio es la propia información obtenida y expuesta con respecto al tipo de ciclo que se usa, los principales tipos de elementos que lo conforman con sus características en cuanto a funcionamiento, materiales y usos; por lo cual se disminuye los tiempos y costos de investigación de este tema, para cuando se tenga las características propias del fluido se podrá someter a comprobación en el uso eléctrico y su verdadera factibilidad.

Este proyecto geotérmico es muy complejo y requerirá en el futuro de un estudio profundo no solo en la parte mecánica, civil y geológica, sino, también en los aspectos medioambientales y sociales que pueden afectar de una u otra forma a las poblaciones de la zona de influencia o bien el caso inverso.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Desde la Antigüedad, el ser humano ha usado las aguas termales con diversos fines. Son conocidos el baño turco o hamán, el baño sauna y las termas romanas (¹). Las aguas termales, géiser (²), los volcanes de lodo, las fumarolas y las erupciones volcánicas son manifestaciones de un mismo fenómeno: el calor terrestre. Este calor proviene del núcleo de la Tierra, que posee una temperatura aproximada de 4000°C; La exploración de yacimientos geotérmicos permite localizar aquellos lugares en los que es posible encontrar agua o vapor a temperaturas elevadas y a profundidades cercanas a la superficie. Los pozos geotérmicos pueden ser de tres tipos: 1) vapor, 2) de líquido (agua caliente) y 3) de una mezcla de vapor y líquido, es por ello que para los cálculos y estimaciones de las características como de las propiedades del fluido geotérmico se basa en las del agua saturada.

Una central geotérmica es muy similar a una termoeléctrica que use como fluido de trabajo el vapor agua, es por ello que se hace comparaciones tanto cualitativas como cuantitativas entre ellas y principalmente con respecto a las emanaciones de dióxido de carbono que en el caso de la centrales geotérmicas se reduce aproximadamente un 1/6 de las emanaciones producidas por centrales térmicas.

Como la perforación de un pozo geotérmico potencial es muy costosa, se utilizan métodos indirectos que permiten aproximarse poco a poco a las posibilidades del lugar en cuestión.

Los beneficios son muchos como:

- Disminuye la necesidad del uso de combustible fósil. Esto reduce la importación de combustible o, en los países productores de combustible

¹ Baño sauna, cuartos calientes de vapor húmedo - Baño turco, cuartos calientes de vapor seco.

² Geysers, fuente termal volcánica en forma de surtidor que emite agua y vapor.

fósiles, hace que haya mayor disponibilidad para la exportación. También fomenta la independencia energética. Hace que la economía de un país sea menos susceptible a los bruscos aumentos en el precio internacional de combustible. A diferencia del combustible fósil, los recursos geotérmicos se renuevan naturalmente.

- El desarrollo de la energía geotérmica tiene un impacto mínimo sobre el medio ambiente comparado con el desarrollo de las fuentes de energía convencional, esto reduce considerablemente la contaminación del aire. Las centrales geotérmicas necesitan poco terreno y cuando se reemplaza un vatio-hora de energía fósil por un vatio-hora de energía geotérmica, se reduce la contribución al efecto invernadero en aproximadamente el 95%, según los investigadores de la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA).
- La geotermia se aplica, entre otras, en las siguientes actividades: generación de electricidad, calefacción de edificios, casas, e invernaderos, secado de frutas, verduras, granos, cacao, forrajes, madera, y otros cultivos, acuicultura, pasteurización, mayor extracción de petróleo, minería y otros procesos industriales.

La producción mundial de electricidad a través de centrales geotérmicas fue de 4 760 MW, la primera central geotérmica que se construyó fue la de Larderello, en Italia, y fue construida por Piero Ginori Conti, en 1904. El segundo país que instaló una central geotérmica fue Nueva Zelanda. Un ejemplo claro en América es México que en 1991 generó 620 MW en la planta de Cerro Prieto, y 80 MW en Los Azufres, Michoacán, ocupando el tercer lugar en la producción de electricidad a partir de energía geotérmica (primero está EUA y después Filipinas) y fue también el tercer país que instaló una central geotérmica en el mundo, la de Pathé, en Hidalgo, que empezó a funcionar en 1959; sin embargo, como producía 150 kW y requería mucho mantenimiento, tuvo que pararse.

1.2 ANTECEDENTES

La actual situación deficitaria, en energía, del sistema eléctrico del País hace indispensable la realización de acciones concretas para revertir esa situación en el menor tiempo posible. Se destaca que el mencionado déficit se ha originado por la falta de proyectos de generación, a pesar de la abundante disponibilidad de recursos hidroeléctricos, geotérmicos y gas natural.

Dentro de las políticas energéticas del actual gobierno se ha asignado una elevada prioridad a modificar la matriz energética y sustituir el uso de combustibles derivados del petróleo, particularmente del diesel, que no se lo refina en el Ecuador y, sin embargo, se lo utiliza de forma intensiva en el transporte y en algunas centrales de generación eléctrica.

La energía geotérmica es una de las fuentes renovables, disponible en el Ecuador, que se la puede utilizar con muchas ventajas económicas y ambientales. Su exploración y desarrollo requiere la aplicación de una serie de investigaciones con un elevado contenido científico-técnico.

En 1978, el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL), comenzó las actividades de exploración de los recursos geotérmicos hasta los años ochenta, pero más tarde, la crisis económica trajo como consecuencia una sensible disminución del interés por los nuevos proyectos de generación, razón por la que se condicionó el desarrollo de las futuras investigaciones geotérmicas a la posibilidad, bastante remota, de que puedan ser financiadas únicamente con recursos no reembolsables de la cooperación internacional; no obstante, con sus propios recursos humanos y económicos, el INECEL continuó desarrollando algunas otras investigaciones de superficie en las áreas de Chalupas y Chachimbiro ⁽³⁾.

En vista que, desde hace algunos años, la ESPE ha estado vinculada con las actividades de exploración geotérmica y que ha desarrollado estudios científicos de interés nacional e internacional, como la caracterización de las aguas termales del Ecuador, junto con el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA), se consideró pertinente aceptar una propuesta de la

³ Chalupas y Chachimbiro, áreas con posible recursos geotérmico en el Ecuador

Corporación para la Investigación Energética (CIÉ) de establecer una alianza estratégica para formular un proyecto de investigación científica y remitirlo al Concurso Nacional de Proyectos (2007) .

Después de que la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT) asumiera la responsabilidad plena del sistema nacional de ciencia y tecnología, se reabrió el concurso nacional de proyectos de investigación en el cual continuó participando el proyecto ESPE-CIE, sobre las investigaciones geotérmicas en Chachimbiro, en la convocatoria del año 2008.

Después que concluyó el proceso de análisis y evaluación, al proyecto se le asignó primera prioridad, a partir de lo cual arrancó el proceso precontractual para la asignación del cofinanciamiento por un monto de \$1'023.080,30, en el que está incluido el 10% de la supervisión a cargo de la SENACYT⁽⁴⁾.

Los referidos documentos han sido organizados y se encuentran actualmente en poder de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE).

1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

El Estudio de Factibilidad para la implementación de una Central Geotérmica de 15 MW, ayudará a la investigación de nuevas fuentes de energía primaria, como es la geotermia, sin afectar al medio ambiente y generando empleo a las personas del área de Chachimbiro para seguir en el desarrollo socio-económico que está encaminado en el país. Con este estudio se dejara una fuente de información básica para la aplicación y construcción de dicha planta en un futuro cercano.

⁴ La información presentada en selección 1.2 Antecedentes es tomada de una publicación realizada por el Ing. Eduardo Aguilera, en donde vale recalcar que en cuanto a la factibilidad de una central en Chachimbiro no existe ninguna documentación. Si se desea conocer más en detalle los documentos que posee actualmente la ESPE sobre el tema, dirigirse al Vicerrectorado de Investigaciones de la Institución con el Ing. Eduardo Aguilera.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

- Realizar el Estudio de Factibilidad para la implementación de una Central Geotérmica de 15 MW en la zona de Chachimbiro con los parámetros técnicos y económicos donde se sustenten los principios de este proyecto y afines.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar los conocimientos adquiridos en el tiempo de estudio en la ESPE.
- Contribuir al estudio e investigación de nuevas alternativas de generación eléctrica por medio de energías no convencionales.
- Realizar un estudio de factibilidad operativa, técnica y económica de los equipos y materiales que intervienen en el funcionamiento del sistema escogido para una central geotérmica de 15 Mw en la zona de Chachimbiro, con el fin de obtener resultados eficientes y lo más apegados a la realidad.
- Realizar el estudio de básico y general de impacto social y medio ambiental en la zona de Chachimbiro con la implementación de una central geotérmica.

1.5 ALCANCE

Se realizará el Estudio de Factibilidad para la implementación de una Central Geotérmica de 15 MW en la zona de Chachimbiro, teniendo en cuenta la delimitación del campo geotérmico y la estimación de las reservas explotables para estudiar el comportamiento termodinámico de los fluidos geotérmicos y sus posibles usos, con fundamentos ingenieriles y una visión a futuro para la implementación de dicha Central, definiendo el ciclo, los materiales, elementos y las partes que intervienen en la misma.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1. SISTEMAS GEOTERMALES

En el planeta se guarda una enorme cantidad de calor, el mismo que es una forma de energía, a su vez, la energía geotérmica es el calor que se encuentra contenido en el interior de la Tierra; muestra de lo antes mencionado son los volcanes y géiseres. Es muy vasto el potencial de energía que se encuentra debajo de nuestros pies, siendo este, aproximadamente 50000 veces la energía que se obtiene de todos los recursos de gas y de petróleo del mundo. Además, la energía geotérmica es limpia, constituye una solución promisoría para todo el mundo a medida que aumenta la preocupación por el calentamiento global, la polución ambiental, y el creciente aumento de los precios en la energía fósil ⁽⁵⁾.

2.1.1. ORIGEN DE LOS SISTEMAS GEOTERMALES

Varias son las teorías que pueden explicar las elevadas temperaturas del interior de la Tierra. Unas sostienen, por ejemplo: que se debe a enormes presiones que existen bajo la corteza terrestre; otras sostienen que se originan en determinados procesos radioactivos internos; y por último, se menciona la teoría que lo atribuye a la materia incandescente que formó nuestro planeta.

2.1.2. LOS RECURSO GEOTÉRMICOS

Los recursos geotérmicos constituyen la parte de la energía geotérmica o calor interno de la Tierra, que puede ser aprovechada en términos económicos por el hombre. Se clasifican habitualmente en dos tipos: recursos geotérmicos de alta temperatura en los que ésta supera los 150 °C y recursos geotérmicos de baja y media temperatura, cuando ésta no alcanza los 150 °C. Las condiciones para la existencia en una zona determinada de recursos de alta temperatura o baja temperatura son diferentes, primando en el primer caso las condiciones de tipo geológico y en el segundo las condiciones de tipo económico. El criterio más

⁵ Energía fósil, energía formada por materia orgánica en el transcurso de miles de años (petróleo).

común para clasificar los recursos geotérmicos es el basado en la entalpía (⁶), en donde, la entalpía puede considerarse más o menos proporcional a la temperatura, este término se utiliza para expresar el contenido de calor (energía térmica) de los fluidos y da una idea de su valor. Los recursos geotérmicos se dividen en baja, media y alta entalpía (o temperatura) y en sus posibles formas de utilización.

2.1.3. CLASIFICACIÓN

Según su temperatura, se identifican diferentes tipos:

Sistemas de Alta Temperatura.- Se localizan en masas de agua suficientemente selladas, los mismos que son sometidos a gran presión y con temperaturas superiores a los 150°C, en los que se puede utilizar el vapor de agua generado naturalmente para producir electricidad de una forma constante, fiable y económicamente rentable.

Sistemas de Media Temperatura.- en donde el agua es sometida a menor presión y con una temperatura que varía entre 100 y 150°C, sirviendo también para la generación de electricidad pero necesitan un fluido intermedio con un rendimiento menor, pero el mejor aprovechamiento puede hacerse mediante sistemas urbanos reparto de calor para su uso en calefacción y en refrigeración

Sistemas de Baja Temperatura.- en donde la temperatura del agua se encuentra por debajo de los 100°C destinados exclusivamente en usos térmicos. Estos yacimientos son mucho más frecuentes y se encuentran en amplias zonas sedimentarias de la corteza terrestre.

Sistemas de Muy Baja Temperatura.- casi la totalidad de la corteza terrestre del planeta constituye un extenso yacimiento de recursos geotérmicos de muy baja temperatura, menos de 30°C, esto se debe a que el subsuelo es capaz de almacenar el calor que recibe el Sol y mantener una temperatura constante a partir de 10 m. de profundidad, pudiéndose usar esta característica para la climatización de viviendas y edificios mediante bombas de calor geotérmicas.

⁶ Entalpía, es una función de estado cuya variación mide la cantidad de calor suministrada o cedida de un sistema a otro a presión constante.

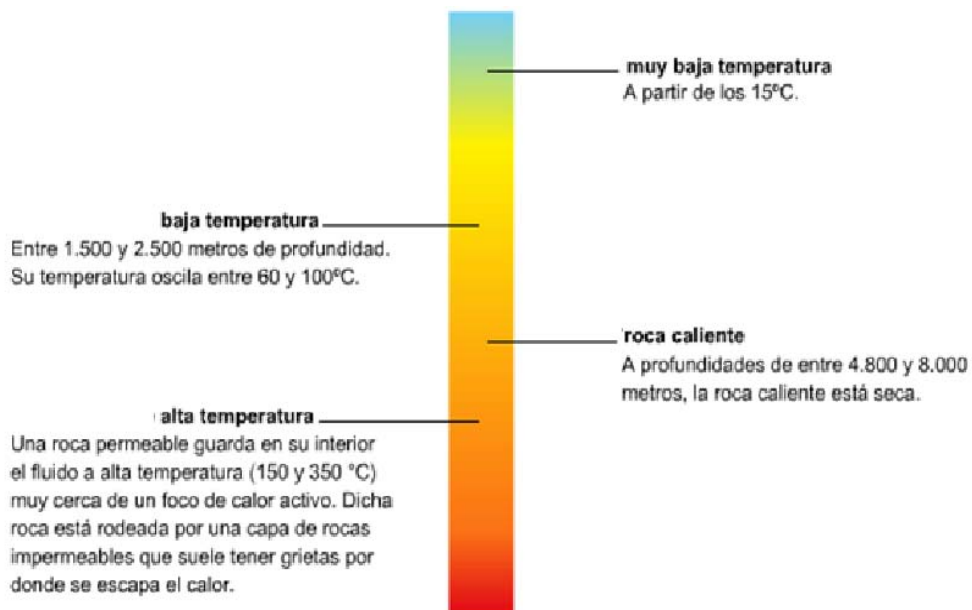


Figura 2.1. Tipos de Sistemas Geotérmicos. [34]

Otra división de los recursos geotérmicos se basa en el estado de equilibrio del reservorio (Nicholson 1993), que considera la circulación de los fluidos del reservorio y el mecanismo de transferencia de calor:

En los sistemas dinámicos el reservorio se recarga continuamente con agua que es calentada, este calor se transfiere por convección y circulación del fluido.

En los sistemas estáticos hay una mínima o nula recarga del reservorio y el calor es solo transferido por conducción, que consisten en rocas sedimentarias permeables, intercaladas en estratos impermeables.

2.1.4. FLUJO DE CALOR Y GRADIENTE GEOTÉRMICO

El gradiente geotérmico es el aumento de la temperatura por la profundidad en la corteza terrestre. Gracias al avance de tecnologías modernas se pueden realizar perforaciones sobre los 10000 metros, en donde su gradiente geotérmico promedio es de 25 a 30°C/km. Sin embargo existen otras regiones alrededor de la Tierra donde el gradiente geotérmico es diferente al valor promedio, en algunas áreas llega a valores menores de 1°C/km y por otra parte, en algunas áreas geotermiales, el gradiente puede llegar hasta 10 veces más el valor promedio.

El flujo conductivo de calor que se genera hacia la superficie se debe a la diferencia de temperatura entre zonas calientes profundas y zonas superficiales más frías, en donde, el flujo de calor en los continentes y los océanos es de 65 y 101 W/m² respectivamente, datos que llegaron a obtener después de haber realizado 24774 mediciones, cubriendo aproximadamente el 62% de la superficie de la Tierra, y que permitieron además determinar estimaciones del flujo de calor en áreas sin mediciones.

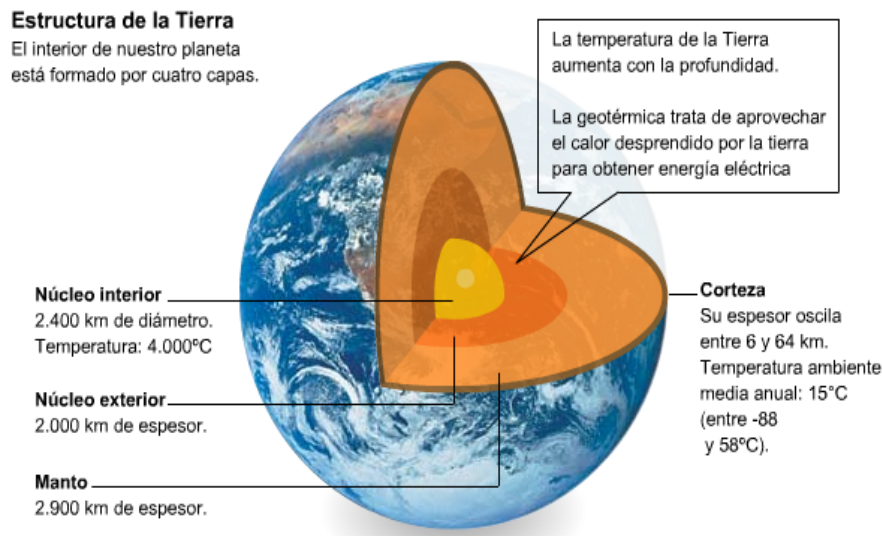


Figura 2.2 Estructura interna de la Tierra. [34]

2.2. CAMPOS O YACIMIENTO GEOTÉRMICOS

Un campo geotérmico es una definición de carácter geográfico que usualmente corresponde a un área de actividad geotermal en la superficie de la Tierra. El calor almacenado que se encuentra en el subsuelo en los campos o yacimientos geotérmicos, se transporta a la superficie por medio de agua almacenada dentro de un acuífero, la misma que puede estar en forma de vapor, líquido y mezcla de ambos según sea las condiciones de temperatura y vapor del mismo.

2.2.1. CLASIFICACIÓN

A continuación se indica una clasificación sencilla y general:

- Yacimiento Hipertérmico con predominio de vapor.- Son yacimientos de alta entalpía, muy útiles para la producción de electricidad, y que

generalmente se los puede identificar debido a las manifestaciones que se producen en la superficie, como géiseres, piscinas termales, fumarolas, etc. pero no son estrictamente demostración de la existencia de un campo cercano, debido principalmente a que el fluido puede viajar, alejándose del área geotérmica.

Es importante indicar que existen:

- Yacimiento de vapor húmedo, básicamente por la presencia de agua en el cabezal del pozo, ejemplos: Cerro Prieto (México), y Wairakei (Nueva Zelanda). El que se espera encontrar en Chachimbiro.
- Yacimiento de vapor seco que se caracterizan por tener condiciones termodinámicas próximas a las de máxima entalpía de vapor saturado (670 Kcal/kg a 31.8 kg/cm² y 236 °C), permitiendo mejores rendimiento en las turbinas generadores de electricidad, ejemplos: Larderello (Italia) y The Geysers (EEUU).
- Yacimiento Hidrotérmico con predominio de agua en fase líquida o yacimiento de agua caliente.- Son yacimientos de baja entalpía, no se presentan manifestaciones superficiales; son mucho más extensos que los yacimientos con predominio de vapor, teniendo mucha semejanza con los de fase de vapor húmedo dominante, con la única diferencia que al fluido que ahora controla su comportamiento termodinámico es el agua. En este tipo de yacimiento es necesaria la presencia de bombas sumergibles en los pozos de extracción.
- Yacimiento en cuenca sedimentaria.- Son yacimientos muy extensos y profundos radicando su interés en una presencia de porosidad y permeabilidad elevada a una gran profundidad, dicho gradiente se entiende que aproximadamente en 2 Km de profundidad la temperatura es < 60°C, incapaz de producir electricidad pero muy útil para calefacción e usos industriales. Ejemplo: Paris en Francia y la cuenca de Panónica en Hungría.
- Yacimiento geopresurizados.- Son un caso particular, su principal característica es que en éstos se encuentra agua caliente a presiones entre 40% y el 90% superiores a la presión hidrostática que corresponde a la profundidad a la que se encuentran y llevan consigo tres tipos de

energía: la geotérmica, la hidráulica (debido a la elevada presión) y la química (debido al gran contenido de metano).

- Yacimiento de roca caliente seca.- Se encuentran formados por rocas impermeables sin contenido de agua, pero con una temperatura elevada (>190°C). La exploración de este tipo de acuíferos no es todavía muy rentable, debido a los numerosos problemas técnicos que se encuentra aún por resolver.



Figura 2.3. Distribución de los principales yacimientos geotérmicos. [2]

Dentro de los tipos de campos geotérmicos ya vistos el ideal sería el hipertérmico seco, donde solo se obtiene vapor a altas temperaturas, pero como en la naturaleza no todo es perfecto y los campos que más se encuentran son los hipertérmicos húmedos, de los cuales se extrae un fluido en forma de mezcla agua-vapor

2.2.2. CAPACIDAD DEL YACIMIENTO

Cuando se tiene planes de explotación de un campo geotermal, es muy importante tener aproximaciones de la cantidad de energía que se puede explotar del campo en estudio. Esto permitirá relacionar el régimen de extracción de calor con las consideraciones comerciales y principalmente económicas. De existir una sobreexplotación podría ocasionar el agotamiento de un campo en menor tiempo que la vida útil de la planta, y reflejándose en los desperdicios de gastos de inversión y en los costos de producción excesivos.

Lamentablemente se pueden hacer estimaciones muy moderadas de la capacidad térmica de un campo, ya que básicamente dependen de un modelo planteado por científicos especializados en el tema, basados en estimaciones. No es aconsejable instalar una central con su mayor capacidad estimada de producción ya que con el pasar de los años se puede producir una declinación lenta de las temperaturas y presiones de vapor, originándose una baja en la producción que se planteo al momento de instalarla, para ello es mejor implementar un central de menor capacidad al principio, y si por alguna causa se observan señales de declinación de la condiciones del vapor antes del término de la vida comercial de la planta, se podría instalar un segunda planta que se ajuste a las nuevas condiciones del vapor.

2.2.3. PRODUCCIÓN Y DECLINACIÓN DE LOS YACIMIENTOS

Un yacimiento geotérmico puede prolongar su producción mientras se mantenga su respectiva fuente de calor y además la recarga del fluido. Por lo general las fuentes que proporcionan el calor se encuentran a temperaturas suficientemente elevadas y además son de gran tamaño. Cuando se habla del mantenimiento del fluido este se encuentra ligado al ritmo adecuado de extracción. Por lo general la vida útil de producción de un yacimiento geotérmico puede alargarse durante muchos años con nuevos pozos o haciendo a los ya existentes más profundos con la finalidad de encontrar acuíferos más profundos. Sin embargo, este es un proceso que no puede prolongarse indefinidamente, debido a que el potencial de un campo geotérmico no es infinito, e inevitablemente con el paso del tiempo el pozo va a envejecer debido en parte a la depositación química, particularmente de sílice, dentro de las fisuras y poros del acuífero.

Económicamente, un pozo tiene una vida finita de aproximadamente 10 años, después, su producción se empieza a ver insuficiente para justificar el mantenimiento continuo del capital invertido y el equipamiento continuo del mismo. Cuando se ha alcanzado esta vida, resulta económico profundizar el pozo o simplemente desecharlo y empezar a perforar un nuevo pozo en otra parte.

2.3 METODOLOGÍA DE EXPLORACIÓN

Al hablar de exploración, perforación y todo aquello que concierne a estos dos temas como son los pozos, la exploración y tipos de perforación nos llevaría un largo tiempo, pero como el objetivo no es el detallar e instruir a la sociedad sobre estos temas, si no, tomarlos en cuenta como parte de la información básica que todo ingeniero mecánico debe saber cuándo planea realizar algún tipo de uso con la energía geotérmica.

Se habla que hoy en día los exploradores geotérmicos no solo se dedican a estudiar, clasificar y descubrir pozos y áreas geotérmicas con usos energéticos, sino también a los de carácter híper y semitermales por la importancia económica que en estos días generan.

2.3.1 TÉCNICAS

La forma de exploración más rudimentaria es la que se hace solamente estudiando la geología conocida, donde se buscan gradientes térmicos mayores a los normales y donde haya evidencia de fallamiento que permitan el elevamiento de aguas calientes.

Los datos que se toman son de carácter: geológico, topográfico, meteorológico, hidrológico, más todas las observaciones de manantiales calientes, géiseres y fumarolas; mas las mediciones geoquímicas y geofísicas; dan una fuente de información básica que al ser estudiada cuidadosamente darán el plan de exploración más apto y viable.

Otros datos que son importantes son sobre las zonas que circunde al campo o área en exploración ya que esta información dará a conocer las anomalías termales que se pueden presentar en un futuro.

2.3.1.1 Funciones del Equipo de Exploración y Evaluación del recurso:

a) Funciones del Equipo

Geólogo.- Llamado entre sus compañeros de trabajo y equipo como “el detective”, el tiene la función de deducir con la mayor precisión posible y en la medida que las circunstancias lo permitan, un modelo tridimensional de la

estructura geológica de una región supuestamente termal hasta una profundidad tan grande como pueda ser practicable y en deducir sitios promisorios de perforación a partir de lo anterior.

Las herramientas que usa son en base a levantamientos geológicos superficiales, sondeos de investigaciones pasadas, manifestaciones superficiales de aguas, minerales, cambios de temperaturas y por ultimo en base a la experiencia obtenida en el transcurso de su carrera.

Geohidrólogo.- Deducir la probables trayectorias a lo largo de las cuales fluye el agua bajo la tierra, a través de y entre los distintos estratos y limites geológicos del modelo del geólogo.

Para su estudio se basa en la información recogida de gradientes, porosidades y permeabilidades de las formaciones geológicas constitutivas.

Geofísico.- El se encarga de buscar las anomalías de todas clases que se pueden dar en el área de estudio y sus alrededores. Dichas anomalías las traslada, las hace visibles, entendibles y posibles de estudio por medio de curvas isothermas, isogalas, líneas de isoresistividad u otras (⁷).

Para su estudio existen muchas técnicas cuyo costo y confiabilidad varían extensamente: La más barata, simple y útil es el termómetro o midiendo la resistividad eléctrica; como cuando hay baja resistividad es debido a la presencia de un campo de agua caliente y por el contrario un campo de vapor tendrá una alta resistividad eléctrica.

Hay muchas más costosas técnicas como: mediciones de gravedad, sísmicas, reflectivas y refractivas; técnicas de microondas; interferencia de radio frecuencia; medición de ruidos del terreno; microsismicidad; audio-magneto-telúricas y exploración aérea de radiación infrarroja. Y la última técnica que cada vez toma más fuerza es la técnica de exploración por satélites artificiales ya que la fotografía de muy largo intervalo puede revelar anomalías que son difíciles de detectar a distancias más cortas.

⁷ Isogala, línea de igual intensidad gravimétrica – Líneas de isoresistividad, son el resultado de emitir corriente continua al terreno.

Geoquímico.- proporciona una de las herramientas más baratas que dispone el explorador geotérmico, en ocasiones evita el desperdicio innecesario de esfuerzos y gastos. Lo que primero hace es analizar los componentes químicos de las descargas termales naturales donde busca los niveles de silicio, magnesio y relaciones de sodio/ potasio, como indicadores de yacimientos de altas temperaturas; así a menor presencia de estos será por haber una mayor temperatura en el interior de la tierra; como también la presencia del hidrogeno, indicador del exceso de temperatura en el interior (más de 200 °C).

El geoquímico en general caracteriza al fluido geotermal en cuanto a temperatura, componentes, etc.

b) Evaluación del recurso

Los pozos tienen dos grupos de características principales las químicas y las físicas, así buena parte de la información toma forma de una serie de curvas en vez de manifestarse como cifras fijas:

- Presión de cabezal
- Temperatura del cabezal
- Producción o flujo de masa de vapor
- Producción o flujo de masa de agua caliente
- Entalpia del flujo
- Calidad del flujo, factor de humedad o sequedad.
- Capacidad calorífica del pozo
- Capacidad de potencia de un pozo

Para medir mezclas se usan varias técnicas como:

- La calorimetría
- Medición con muestreo
- Separación de fases y medición de cada fase por separado
- Método de la presión critica en el labio.
- Método de los conos
- Rayos beta e isotopos

Es importante que en el proyecto de Chachimbiro al comenzar con la explotación del recurso se hagan mediciones continuamente de la presión óptima en el cabezal y la velocidad en el mismo, esto es para optimizar recursos, reducir gastos de válvulas, bombas e inyectores; es por ello que para tener una presión óptima en el cabezal se utilizan tuberías de descarga para bajar la presión hasta la mínima necesaria para que fluya naturalmente sin problemas y de forma controlable.

2.3.1.2 Perforaciones

La perforación de vapor y agua caliente al igual que la exploración, son ramas de la geotermia que pueden ser estudiadas con mayor detalle, aquí se da una explicación rápida y superficial de las mismas.

Para campos hipertérmicos las profundidades que alcanzan los pozos son entre 500 a 2000, con excepciones.

Para pozos en campos semitérmicos y en acuíferos de bajo grado llegan a estar a profundidades promedio de 1800 m con excepciones como en algunas regiones donde se encuentran a baja profundidad como 30 a 300 m.

Para pozos geopresurizados se pueden llegar a profundidades record como 6000 m (industria petrolera).

El espaciamiento entre pozos no está estandarizado pero se sugiere por experimentación que para pozos de 500 m de profundidad sea de 100 m y hasta unos 300 m de separación para profundidades de 2000 m.

2.3.2 Recolección y transporte de fluidos

2.3.2.1 Equipo Superficial

Los fluidos deben ser tratados antes de llegar a la turbina generadora, para lo cual se utilizan sistemas mecánicos, electrónicos, entre otros para así controlar y dejar al fluido en una mejor condición de lo extraído. Los elementos más utilizados son las válvulas del cabezal del pozo, válvulas de seguridad, separadores, silenciadores, sistemas de descarga, dispositivos de seguridad, vaporductos y troncales de los mismos.

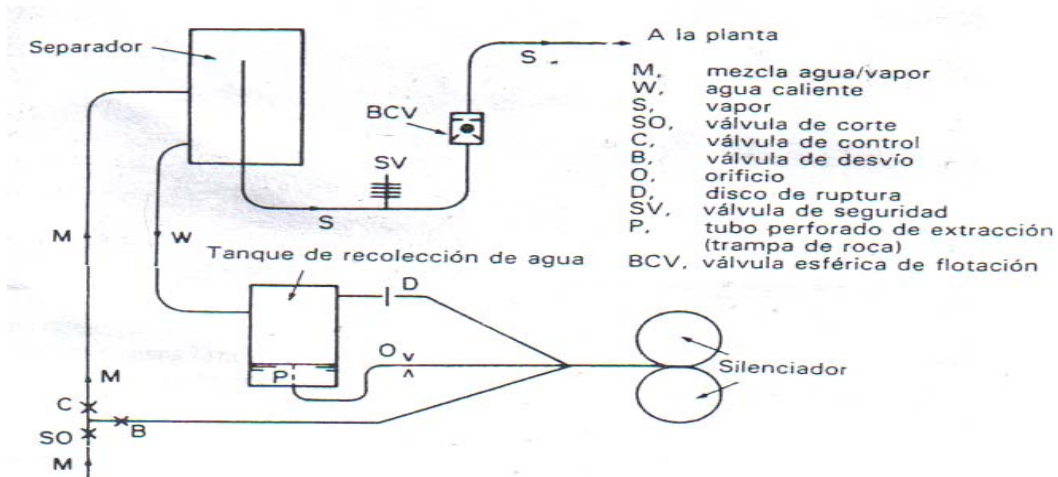


Figura 2.4 Disposición esquemática de un equipo superficial con sus elementos principales par un pozo húmedo (mezcla vapor-agua).

2.3.2.1.1 Bombas

Es una máquina hidráulica que se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud.

En las centrales geotérmicas el tipo de bombas más utilizadas son las bombas rotodinámicas – radiales o centrífugas, ya que se tiene un fluido continuo. Además de esto normalmente son de accionamiento electrónico, esto es que consumen electricidad de la misma planta y su sistema esta computarizado.

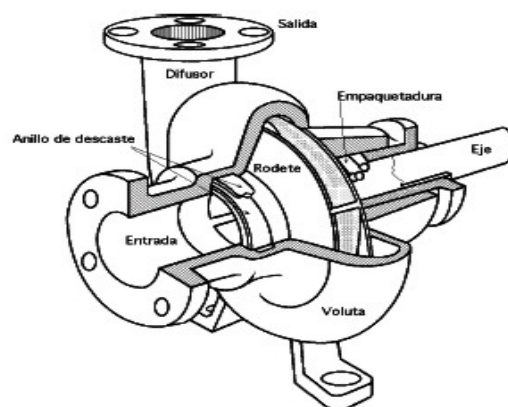


Figura 2.5 Esquema de una bomba centrífuga.

2.3.2.1.2 Tanques de recolección

Estos elementos se utilizan en la recolección del fluido geotérmico proveniente de los separadores. También se usan para absorber las fluctuaciones de corta duración o llamado cabeceo que produce la mezcla agua/vapor al pasar por el sistema de tuberías de recolección.



Figura 2.6 Fotografía representativa de un par de tanques de recolección.

2.3.2.1.3 Silenciadores

Cuando la producción de vapor es muy grande en términos de cantidad de caudal sobre la capacidad de producción de la planta, es necesario este exceso desecharlo para no someter al sistema a sobrepresiones que puedan causar daños; el ruido que genera los vapores desechados puede ocasionar muchas molestias no solo para quienes trabajan cerca de la planta sino para la fauna y las personas aledañas a la zona de desecho.

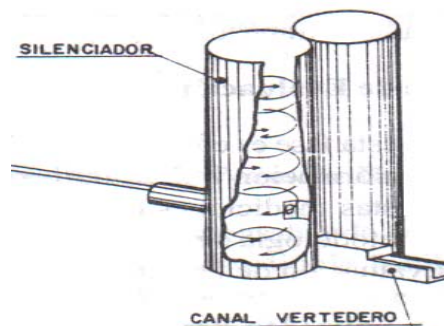


Figura 2.7 Silenciadores para centrales geotérmicas.

2.3.2.1.4 Limpiadores de vapor

Este mecanismo se usa solo cuando los separadores de mezcla están muy cerca de la planta generadora, se los usa para evitar que los cloruros pasen a las turbinas ocasionando problemas de corrosión (ver subcapítulo 5.8),

usualmente esto se da con la conducción de los fluidos bifásicos por medio de las tuberías (ver subcapítulo 5.5 sección 5.5.2).

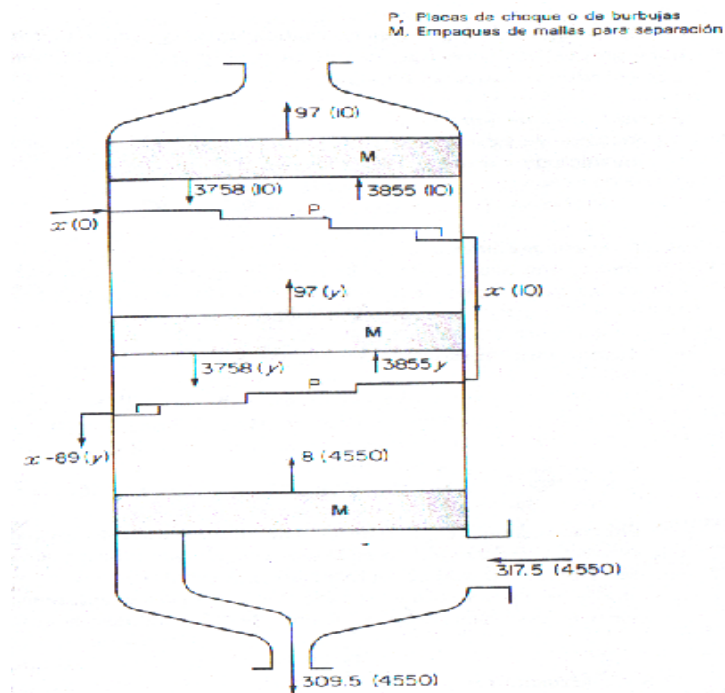


Figura 2.8 Esquema de un limpiador de vapor, prototipo usado en Wairakei.

2.3.2.1.5 Para gases no condensables

a) Extractores de gases, Son maquinas que se las utiliza con dos finalidades:

- Producir el vacio necesario en el condensador
- La extracción de los gases no condensables del sistema hacia la atmosfera < 10%, sino, deberá tomarse en cuenta el ciclo binario.

b) Eyectores, El eyector es una bomba de vacío, generalmente movida por vapor, que no tiene partes móviles y que es capaz de alcanzar presiones absolutas de entre 1 micrón y 30 pulgadas de Hg. Estos sirven para igual que los extractores de gases generar el vacio. Existen de dos tipos:

Activados por vapor, son más baratos y no requieren de grandes cantidades de vapor, comparado con los de agua.

Activados por agua, estos son más eficientes que los de vapor porque en estos no intervienen las pérdidas de calor latente.

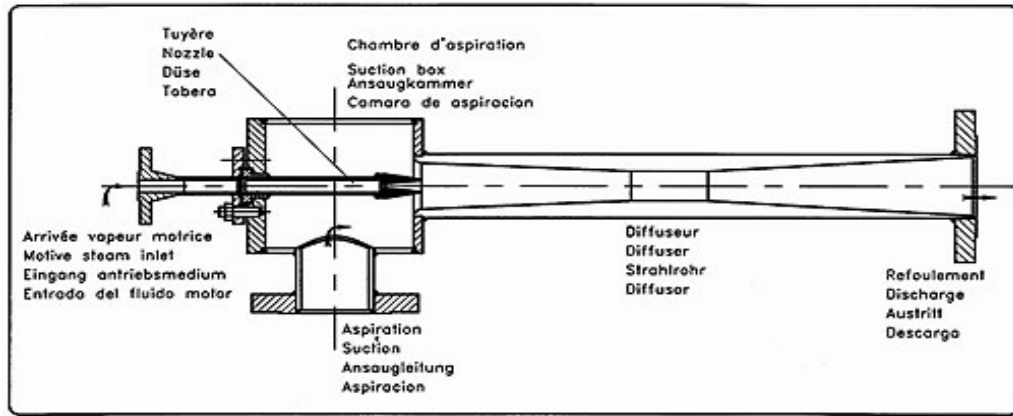


Figura 2.9 Esquema de un tipo de eyector usado en geotermia.

2.3.2.1.6 Acoples y accesorios

Entre las características se encuentran: tipo, tamaño, aleación, resistencia, espesor y dimensión.

La capacidad de una central geotérmica irá aumentando de acuerdo con la cantidad de vapor o agua caliente que se vaya extrayendo y para ello se usan los accesorios como: Anclajes, Soportes, Bridas, Tés, Codos, Reductores, Empacaduras, Juntas de expansión, Múltiple, Válvulas, Disco ciego.

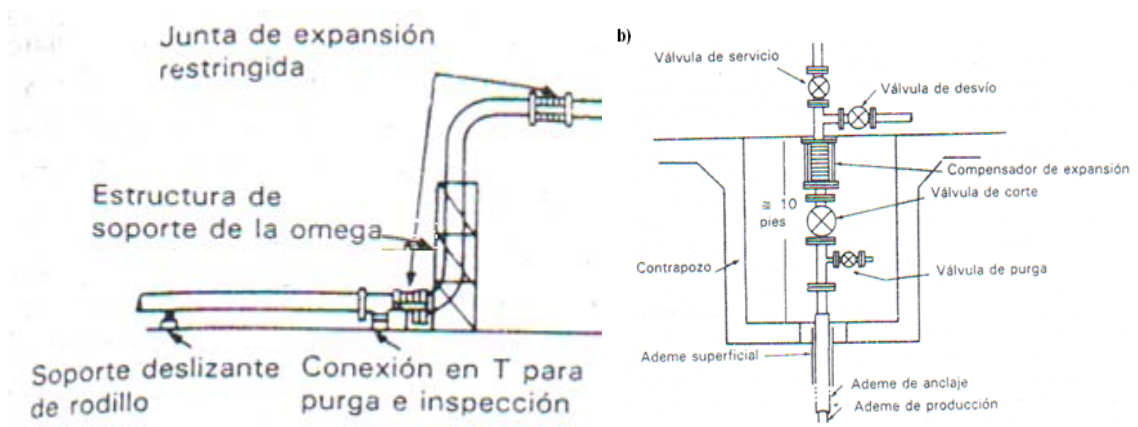


Figura 2.10 Esquema representativos de los acoples y accesorios de una tubería en una central geotérmica.

2.3.2.2 Elementos y partes de una central geotérmica como la que se considerará en Chachimbiro

2.3.2.2.1 Turbina de vapor

Las turbinas de vapor son turbomáquinas en las que sólo se efectúa el proceso de expansión y disminuye su temperatura y se reduce su energía interna. Esta reducción de la energía interna se transforma en energía mecánica por la aceleración de las partículas de vapor, lo que permite disponer directamente de una gran cantidad de energía. Si bien existen turbinas a vapor del tipo radial, la inmensa mayoría son del tipo axial, que se estudian en este proyecto. Se las puede clasificar según el salto térmico y según el principio operativo.

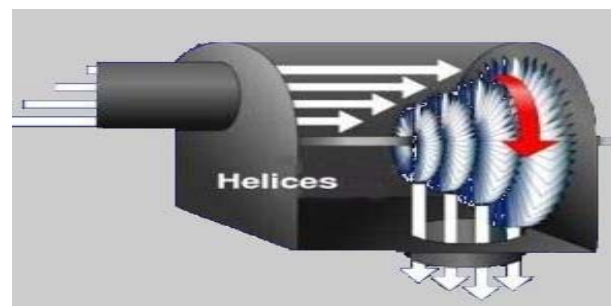


Figura 2.11 Esquema del funcionamiento de una turbina de vapor de agua.

Según el principio operativo:

- **Las turbinas de Acción:** en la que los chorros de la turbina están sujetos a un punto dentro de la carcasa de la turbina, y las palas están dispuestas en los bordes de ruedas que giran alrededor de un eje central. La turbina está diseñada de forma que el vapor que entra por un extremo de la misma se expande a través de una serie de boquillas hasta que ha perdido la mayor parte de su energía interna.
- **Las turbinas de Reacción:** la energía mecánica se obtiene de la aceleración del vapor en expansión. Las turbinas de este tipo cuentan con dos grupos de palas, unas móviles y las otras fijas. Las palas están colocadas de forma que cada par actúa como una boquilla a través de la cual pasa el vapor mientras se expande. Las palas de las turbinas de reacción suelen montarse en un tambor en lugar de una rueda. El tambor actúa como eje de la turbina.

En los dos casos, tanto de una como de varias etapas, la diferencia fundamental es que en las turbinas de acción no hay cambio de presión

en la rueda móvil, obteniéndose el intercambio de energía por el cambio de velocidad absoluta del fluido.

Según el proceso se dividen en:

- Turbina de condensación; son las más utilizadas en las centrales geotérmicas, donde la turbina descarga al condensador el fluido, donde se fija la temperatura de condensación y en consecuencia la presión para respetar las condiciones de equilibrio líquido-vapor saturado. Como ejemplo si se sitúa una temperatura en el condensador entre 40 a 60 °C, la presión será menor a la atmosférica entre 0.07 y 0.2 bar absolutos, para lo cual se utiliza ya sea una bomba de extracción o bien una extracción mediante eyector de vapor. El problema es que el vapor descargado es húmedo y a un nivel térmico muy bajo, que es poco útil para otros procesos como de calefacción.
- Turbina de contrapresión; Esto se da cuando se puede descargar el vapor de la turbina a una presión superior a la atmosférica. Pero el gran problema es que este tipo de turbinas sacrifican gran cantidad en parte de la conversión de entalpía en energía mecánica.
- Turbinas de condensación con extracción intermedia; este tipo es una combinación de las dos anteriores, es como dos turbinas asociadas en serie, donde en una primera fase el vapor al pasar por la turbina y a su salida se extrae parte del mismo y el resto pasa a una segunda etapa. Su ventaja es la adaptabilidad a la variación de demanda de calor o electricidad, mediante la modulación de la tasa de extracción.

La clasificación según el mecanismo:

Se han ideado varios dispositivos especiales para la generación de energía geotérmica, varios de estos han llegado incluso a una etapa de laboratorio o de prototipo experimental, mientras que otros son simples concepciones en papel, como: el Impulsor primario Sprankle HPC (*Hydrothermal Power Company*) para salmueras hirvientes. La turbina *Armstead – Hero en bocas de pozo*. La turbina bifásica trabaja con mezcla de agua/vapor

2.3.2.2.2 Separador de vapor

En los campos geotérmicos de alta entalpía con predominio de agua, en los que se utiliza la energía geotérmica para generar electricidad, se requiere separar la mezcla líquido – vapor que emana de los pozos de dichos campos, los mismo que presentan condiciones en donde la presión absoluta puede estar comprendida entre los 5 y 10 bar y el título de la mezcla entre 0.1 y 0.5, impidiendo conducir dicha mezcla directamente a la turbina. Para efectuar dicha separación se utiliza un separador líquido – vapor, siendo el más común y utilizado en centrales geotérmicas el separador ciclónico que aprovecha la diferencia de densidades entre ambas fracciones.

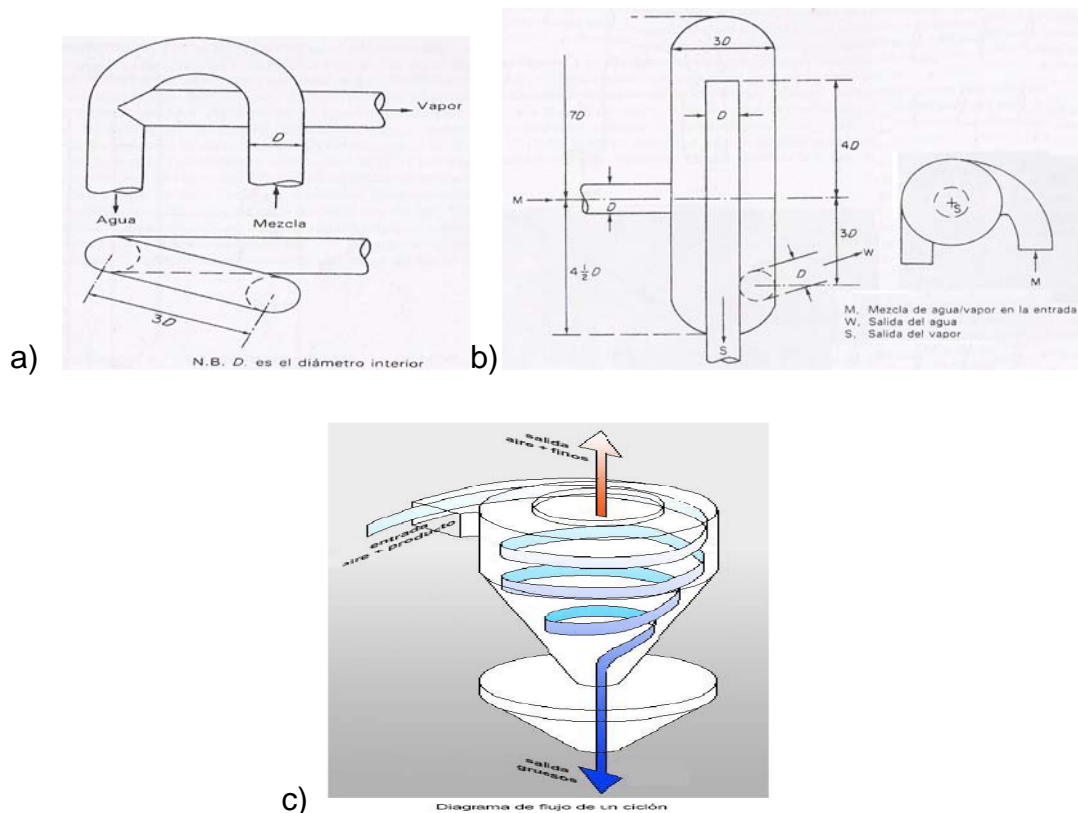


Figura 2.12.a) Separador de vuelta en “U” b) Disposición esquemática y proporcional recomendadas del separador de vapor – agua Webre con entrada en espiral. [1] c) Disposición esquemática del separador de vapor – agua Cicloide. [53]

2.3.2.2.3 Condensador

Termodinámicamente, es un elemento intercambiador térmico, en el cual se pretende que cierto fluido que lo recorre, cambie a fase líquida desde su fase gaseosa mediante el intercambio de calor (cesión de calor al exterior, que se pierde sin posibilidad de aprovechamiento) con otro medio. En otras palabras más comunes uno de ellos se enfría, pasando de estado gaseoso a estado líquido y el otro se calienta.

En cualquier central geotérmica eficiente es indispensable el uso de un condensador. El objetivo primordial de un condensador es el de mantener la temperatura de condensación lo suficientemente baja para que la relación de expansión en la turbina sea alta, obligando al fluido geotérmico a realizar un salto entálpico que sea lo suficientemente rentable.

Se fabrican en tamaños y disposiciones diversas para ser empleados en numerosos procesos térmicos.

La presión absoluta y la temperatura para el vapor de agua saturado, o para una mezcla de vapor y líquido, están relacionados debido a que la presión absoluta es función solamente de su temperatura.

Tipos:

Una clasificación amplia de los condensadores es la siguiente:

Condensadores de mezcla:

- Condensadores de chorro
- Condensadores barométricos

Condensadores de superficie (poco usado en geotermia)

Condensador de contacto directo o de chorro.- Los dos tipos son similares por lo que se refiere a la forma en la cual el vapor de escape y el agua de refrigeración se ponen en contacto directo. Los condensadores en los cuales el agua de refrigeración, el condensado y los gases no condensables son evacuados por medio de una de una sola bomba, se denominan condensadores de chorro, de vacío reducido y de bajo nivel.

Una variación a este tipo de condensadores es el barométrico, el cual la diferencia esencial es que mantiene al condensador a baja presión para de esta manera maximizar la energía extraída por el vapor. Para esto se utiliza una bomba de extracción de condensado o bien una columna barométrica, que consiste en una carcasa, fosa o recinto dentro del cual cae una en forma de ducha el agua fría, mientras que el vapor circula en contra corriente, el agua de enfriamiento proveniente de una torre de enfriamiento o de una acuífero grande (rio o laguna), para ser los dos fluidos descargados conjuntamente en el fondo de dicho recinto.

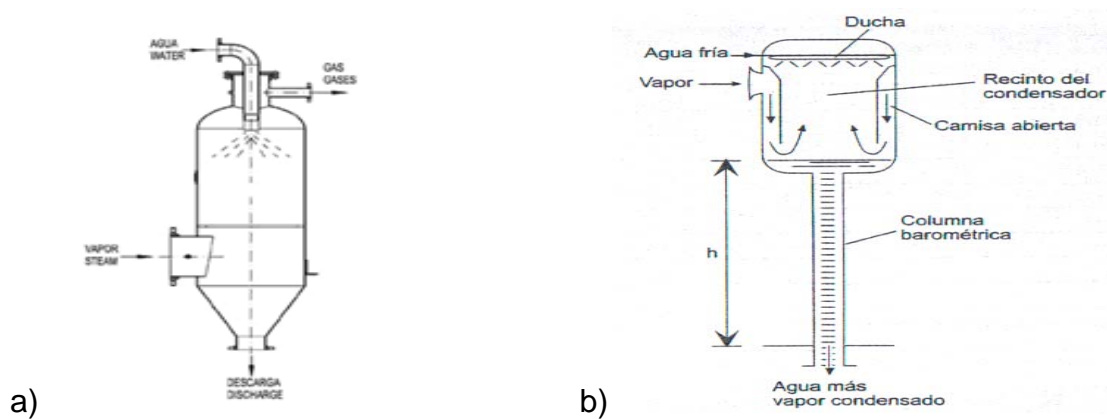


Figura 2.13.a) Esquema de un condensador tipo chorro de contacto directo, donde se muestra su funcionamiento y la estructura. .b) Esquema de un condensador tipo barométrico de contacto directo, donde se muestra su funcionamiento y la estructura. [2]

2.3.2.2.4 Torre de enfriamiento

Una torre de refrigeración es una instalación que extrae calor del agua mediante evaporación o conducción.

Parte del agua se evapora, causando la emisión de más calor. Por eso se puede observar vapor de agua encima de las torres de refrigeración.

Clasificación:

Para estas dos maneras de extracción la industria geotérmica de hoy ha ideado dos procesos:

- El primero son torres de enfriamiento sin recirculación de agua, una vez que sale el líquido de la misma no regresa.
- La segunda son torres de enfriamiento con recirculación, con lo cual se logra reutilizar el líquido tan vital y costoso como es el agua. Este proceso se llama cerrado y se lo hace mediante un sistema de bombeo, como en las termoeléctricas.
- De acuerdo a su mecanismo de circulación de aire, se clasifican en:
Torres de enfriamiento de tiro natural. Se conocen así cuando el aire frío y seco que circula por la parte inferior de la torre por diferencia de densidades haciendo por la misma para salir caliente y húmedo
Torres de enfriamiento de tiro mecánico.
 - Tiro inducido
 - Tiro forzado

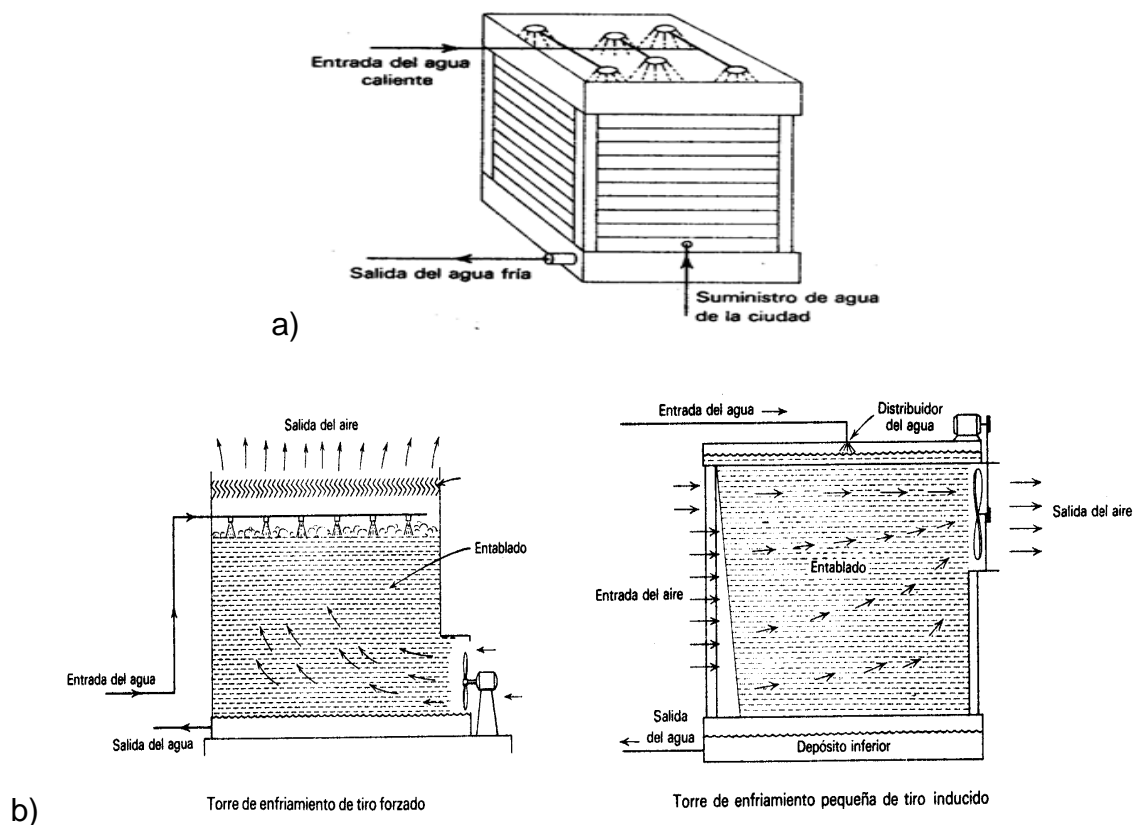


Figura 2.14.a) Esquema de una torre de enfriamiento de tiro natural. b) Esquema de una torre de enfriamiento de tiro forzado e inducido.[57]

2.3.2.2.5 Sistema de tuberías.

La tubería es un conducto que cumple la función de transportar agua u otros fluidos, se suele elaborar con materiales muy diversos.

En la geotermia, el fluido que es explotado desde varios pozos a distintas distancias de la boca de pozo y a su vez de los mismos a la central de maquinas, necesita un sistema de tuberías que sean lo suficientemente apto y capaz de transportar dicho fluido geotérmico en cualquiera de sus fases y a lo largo de todo del sistema con las características propias en cada una de sus etapas.

Tipos y características

Hay tres métodos de fabricación de tubería.

- Sin costura (sin soldadura). La tubería se forma a partir de un lingote cilíndrico el cuál es calentado en un horno antes de la extrusión. En la extrusión deforma con rodillos y posteriormente se hace el agujero mediante un penetrador. La tubería sin costura es la mejor para la contención de la presión gracias a su homogeneidad en todas sus direcciones. Además es la forma más común de fabricación y por tanto la más comercial.
- Con costura longitudinal. Se parte de una lámina de chapa la cual se dobla dándole la forma a la tubería. La soldadura que une los extremos de la chapa doblada cierra el cilindro. Por tanto es una soldadura recta que sigue toda una generatriz. Variando la separación entre los rodillos se obtienen diferentes curvas y con ello diferentes diámetros de tubería. Esta soldadura será la parte más débil de la tubería y marcará la tensión máxima admisible.
- Con soldadura helicoidal (o en espiral). La metodología es la misma que el punto anterior con la salvedad de que la soldadura no es recta sino que recorre la tubería siguiendo la tubería como si fuese roscada.

2.3.2.3 Aislamientos térmicos

Aislamiento térmico es la capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor por conducción. Se evalúa por la resistencia térmica que tienen. La medida de la resistencia térmica o, lo que es lo mismo, de la capacidad de aislar térmicamente, se expresa, en el Sistema Internacional de Unidades (SI) en $m^2 \cdot K/W$. La resistencia térmica es inversamente proporcional a la conductividad térmica.

Ejemplos de estos aislantes térmicos específicos pueden ser las lanas minerales (lana de roca y lana de vidrio).

2.3.2.4 Caídas de Presión y Velocidad límite

Este es un efecto directo en el transporte de fluidos por tubería, esto se da por que la presión al ingreso a la tubería es diferente que la de salida ya que se va perdiendo a lo largo de la misma y el volumen del fluido aumenta; es por ello que en tramos cortos se debe restituir la presión; en tuberías con acoples, curvas, desvíos, modificaciones y demás, la caída de presión es mayor que una completamente recta y para esto hay manuales que permite el cálculo del mismo.

El vapor al ser transportado al igual que un fluido en dos fases tienen una velocidad y esta depende de dos consideraciones:

- No debe exceder la caída de presión permitida entre la presión económica de cabezal supuesta (la presión a la que sale el fluido del pozo) y la presión de admisión de diseño en la planta de explotación (la presión mínima requerida para que el vapor impulse a la turbina).
- La velocidad no deben exceder según lo recomendado por James con su fórmula a base de la experimentación:

$$v = \frac{1300}{P^{0.54}}$$

v es la velocidad del vapor en pies/s
 P es la presión del vapor en $lb/pulg^2$ abs.

Para cualquier caso de conducción de vapor de agua como en este estudio la velocidad no debe sobrepasar los 150 pies/s. Y dependerá

exclusivamente de las pérdidas de presión que se tolere en cada uno de los tramos.

Si la velocidad es muy rápida lo que hace es que arrastra al condensado de tal manera que no se logra separar en los puntos ya determinados para ello, y otro problema es que puede ocasionar daños en la tubería por golpes de ariete.

A parte otros problemas que ocurren son debidos a las altas velocidades que ocasionan vibraciones y erosiones en los accesorios de la tubería como con las válvulas.

En cuanto al agua caliente el problema de tener altas velocidades es que la fricción que el fluido ejerce sobre la tubería podría causar caídas de presión grandes y en algunas rugosidades de la misma generar concentraciones locales de fricción produciendo burbujas de vapor.

CAPITULO 3

MARCO CONCEPTUAL

3.1 POTENCIAL DE LA ENERGÍA DE LOS FLUIDOS GEOTÉRMICOS

La energía geotérmica se la está aprovechando como fuente primaria de energía para la generación eléctrica en varios países del mundo, como los Estados Unidos, Filipinas, México, Indonesia, Nicaragua, El Salvador, Kenia, etc.

En los países de Centro América que poseen características similares a las de Ecuador y en especial a la zona de Chachimbiro se puede observar el crecimiento de la explotación de los recursos geotérmicos año tras año, lo cual acredita el gran potencial eléctrico que tienen los recursos geotérmicos.

Tabla 3.1. Crecimiento de la explotación de los recursos geotérmicos en los países de Centro América

PAIS	1982 (Mwe)	1990 (Mwe)	1995 (Mwe)	2000 (Mwe)	2005 (Mwe)	2007 (Mwe)	2010 (Mwe) aproximado
Costa Rica	NA	0	55	142.5	163	163	197
El Salvador	95	95	105	161	161	204.2	204
Guatemala	NA	0	33.4	33.4	33	53	53
Nicaragua	30	35	70	70	77	87.4	143
Total	125	130	263.4	406.9	434	506.8	597

Fuente: IGA Webpage (2008); c#Bertani, (2007), donde NA, significa no habilitado, o sin valor.

Tabla 3.2 Porcentaje equivalente de lo que representa la producción de energía eléctrica por medio de la geotermia del total de producción de energía en cada país por diferentes métodos.

País	Porcentaje de producción de electricidad a partir de energía geotérmica en cada país hasta el 2007	Centrales en producción
El Salvador	27%	Berlín & Ahuachapán
Nicaragua	6%	Momotombo
Costa Rica	16%	Miravalles
Guatemala	4%	Zunil and Amatitlan

Fuente: IGA Webpage (2008); c#Bertani, (2007)

En cuanto al Ecuador en el año 2005, el total de la generación bruta de energía eléctrica llegó a 15127.47 GWh, de los cuales 13552.06 GWh (89.5%) se entregaron al Mercado Eléctrico Mayorista (MEM). En cuanto a las fuentes de generación, el 45.50% fue hídrica; el 43.11% térmica y solar; y el 11.39% de importación.

En vista de la necesidad de disponer de un valor referencial sobre el potencial energético aprovechable para la generación eléctrica en las áreas de interés geotérmico, antes de que se realicen las perforaciones exploratorias, el INECEL desarrolló un estudio preliminar fundamentado en el método volumétrico y la cantidad de calor magmático, donde se obtuvo una estimación de la Potencia Eléctrica instalable en las áreas de Tufiño, Chachimbiro y Chalupas. (La única forma de comprobarlo es mediante las perforaciones profundas y las pruebas de producción).

Tabla3.3 Potencial Geotérmico del Ecuador

AREA	POTENCIA (Mw)
1. Tufiño - Chiles	201
2. Chachimbiro	156
3. Chalupas	411
T O T A L	768

Fuente: ver referencia, [19]

3.2 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA.

En el Ecuador se puede decir que al no existir ningún tipo de construcción o estudio de factibilidad de una centra geotérmica, no se tiene datos de evolución o cambios específicos, como los que se dan en cada uno de los países donde se realiza la geotermia por años, porque cada uno tiene sus propias dificultades y características que pueden hacer cambiar un diseño básico de dichas centrales.

Para obtener un cálculo rápido de la capacidad de generación de un pozo una vez perforado se puede usar las formulas James para pozos húmedos entre 400-600 Btu/lb (222-333 cal/g) y presiones de labio a 100 lb/pulg² y de 175 lb/pulg² de cabeza de pozo da una precisión de ±5%.

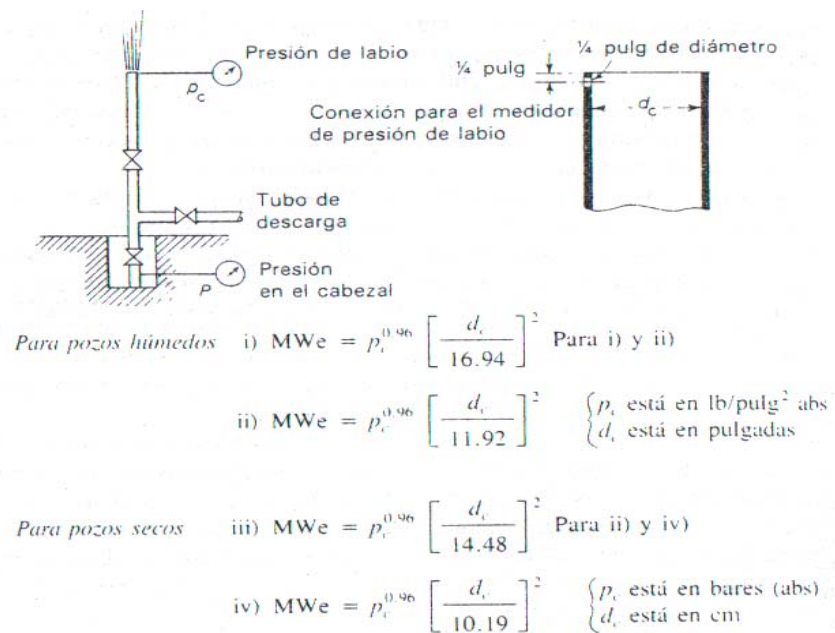


Figura 3.1 Formulas de James para la estimación de la capacidad de generación de potencia eléctrica de un pozo ya perforado. [2]

3.3 CICLOS

3.3.1 ANALOGÍA CICLO RANKINE CON LA GEOTERMIA

Para aprovechar la generación eléctrica mediante energía geotérmica se utiliza un ciclo de potencia semejante al utilizado en las centrales termoeléctricas convencionales debido a que funcionan a base del mismo fluido de trabajo que es el vapor de agua. Por lo cual para los cálculos del sistema de una central geotérmica se usaran las mismas propiedades de dicho fluido. El ciclo que más se utiliza para geotermia es el ciclo Rankine (⁸). Donde el vapor de agua que se produce en una caldera de una termoeléctrica es remplazado por el yacimiento geotérmico (mayor detalle Sección 2.2). El vapor de agua que se obtiene posee sustancias corrosivas, venenosas y gases nobles pero es tratado con las tablas y propiedades de vapor de agua saturado. Basado en los criterios de los especialistas Jaume Pous, Lluís Jutglar presentados en su libro “Energía Geotérmica”, capítulo 5, página 91, en el 2004. Y de H.Christopher y H. Aermstead publicados en su libro “Energía Geotérmica” Capítulo 10, pág. 223, en el 1989.

Luego es llevado a una turbina donde produce energía cinética gracias a que consume un caudal de vapor de alto contenido energético, donde perderá presión. Su camino continúa al seguir por la turbina, es devuelto al exterior en condiciones menores a las de ingreso, esta diferencia se la conoce como el trabajo generado por el fluido en un ciclo abierto; si el fluido se lo vuelve a utilizar será un ciclo cerrado, esto se logra condensando el fluido con un condensador donde lo que queda de vapor pasa a estado líquido para poder entrar a una bomba que le subirá la presión para nuevamente poder ingresarlo al principio del ciclo. Existen algunas mejoras al ciclo, como por ejemplo agregar sobrecalentadores a la salida del separador de vapor – agua, que permitan obtener vapor sobrecalentado para que entre a la turbina y aumentar así el rendimiento del ciclo.

⁸ Rankine, físico e ingeniero escocés William Rankine nacido en 1859.

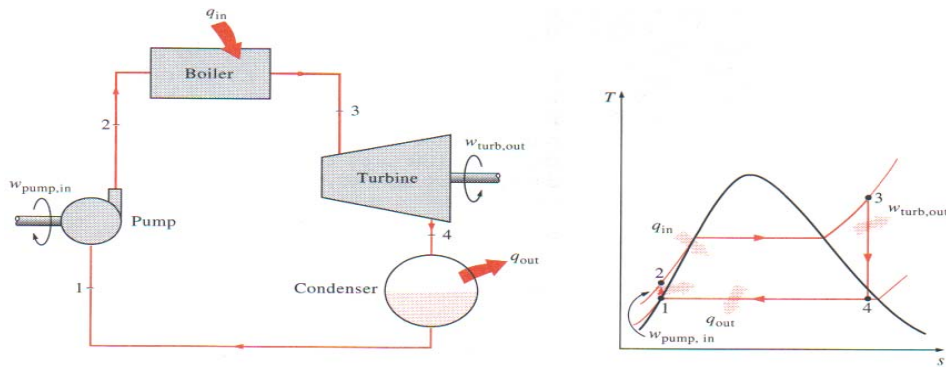


Figura 3.2 Ciclo Rankine ideal y simple [5]

Este es el primer caso del ciclo Rankine, donde se lo hace de manera simple e ideal, esto es para empezar a entenderlo, donde todo el calor y trabajo que ingresa al ciclo luego es dado en su totalidad en calor externo y trabajo de salida como en una turbina de vapor.

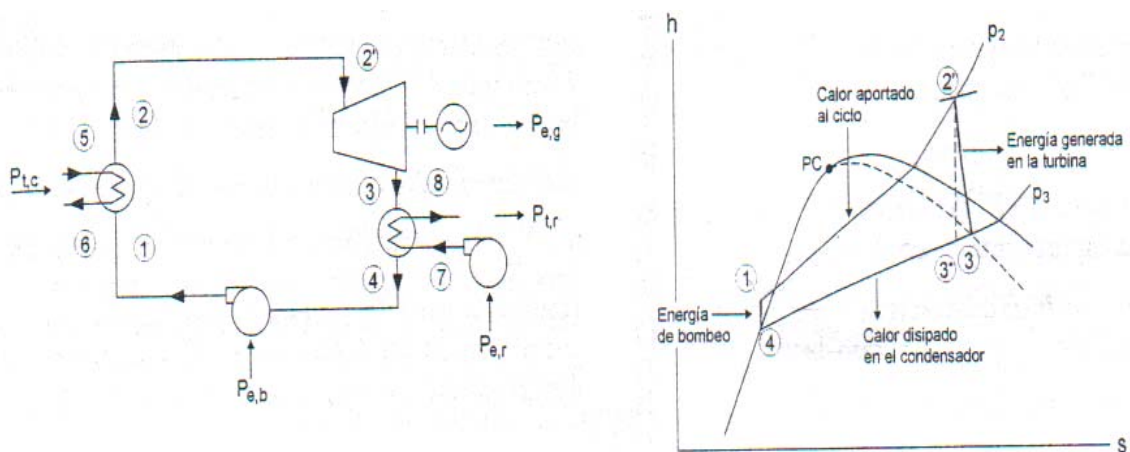


Figura 3.3 Esquema del Ciclo Rankine más real, simple y su representación en un diagrama entalpia –entropía; referencia [5]

Con este esquema sencillo, más real del ciclo Rankine, se considera de forma teórica que se trabaja entre dos presiones, una alta p_1 , p_2 y otra baja p_3 , p_4 , con una fuente como caldera (en geotermia es los yacimientos geotérmicos) que proporciona el calor al fluido, una turbina, una bomba y condensador.

El ciclo si lo dividimos por tramos sería así:

1-2, El fluido que es bombeado se calienta hasta la fase de vapor donde se lo sobrecalienta hasta una temperatura 2 a la misma presión (calor aportado al

ciclo). En la geotermia es por medio del calor del suelo a un acuífero formando yacimientos hipertérmicos durante varios años.

$$P_{t,C} = Q(h_1 - h_2)$$

Donde: $P_{t,C}$ es el calor por unidad de tiempo aportado en el ciclo, viene dado en kWt

Q , es el caudal del fluido dado en kg/s

h_1 y h_2 , son las entalpias del fluido a diferentes temperaturas y esta dado en KJ/kg.

Para producir esta potencia se necesita una fuente que en este caso es la aportada por la caldera entre 5 y 6 (yacimientos hipertérmicos);

$$P_{t,C} = Q_c(h_5 - h_6)$$

Donde: $P_{t,C}$ es el calor por unidad de tiempo aportado por el fluido caliente a través de los gases de combustión de la caldera (calor aportado por el calor del suelo al agua para producir vapor en el capo hipertérmico), viene dado en kWt

Q , es el caudal del fluido caliente dado en kg/s

h_5 y h_6 , son las entalpias del fluido caliente a la entrada y salida respectivamente de la caldera y esta dado en KJ/kg.

2-3 Se produce la expansión del vapor en la turbina generando energía mecánica y dicho vapor pierde presión p_3 , con una t_3 y x_3 . La potencia eléctrica generada por el grupo turboalternador (de igual manera que con una turbina de vapor usada en un sistema geotérmico, la diferencia está en los materiales), está dada por:

$$P_{e,g} = Q(h_2' - h_3)(\eta_i \eta_m \eta_e)$$

Donde: $P_{e,g}$ Potencia eléctrica generada, viene dado en kWh

Q , es el caudal del fluido caliente dado en kg/s

$h_2' - h_3$, son las pérdidas debidas al rozamiento y disipación del calor, dada en KJ/kg.

3-4 El fluido al salir de la turbina sale a una presión p_3 a otra temperatura que la de ingreso con lo cual el fluido cambia su estado y es una mezcla líquido-vapor que va un condensador para disipar el calor de dicha mezcla, donde la potencia térmica que debe extraer el condensador (esto se cumple con el sistema geotérmico) está dada por:

$P_{t,r} = Q(h_3 - h_4)$ y debe cumplir con la de refrigeración:

$$P_{t,r} = Q_r C_{pr} (T_8 - T_7)$$

Donde: $P_{t,r}$ Potencia de refrigeración

Q_r , es el caudal del fluido refrigerador dado en kg/s

C_{pr} Calor específico del mismo kJ/kg C

T_8 y T_7 , son las temperaturas de entrada y salida en grados centígrados.

Si se requiere mover el fluido por el condensador se utilizara una bomba o ventilador:

$$P_{e,r} = Q_r v_r \Delta p_r / \eta_{b,r}$$

Donde: v_r es el volumen específico del fluido refrigerante dado en m^3/kg .

Δp_r Es la diferencia de presión entre bocas de aspiración e impulsión.

$\eta_{b,r}$ es la eficiencia del grupo motobomba o del ventilador de refrigeración.

4-1 En este tramo el fluido una vez que ha perdido su calor es nuevamente llevado a la caldera recuperando la presión inicial p_1 para lo cual se usa una bomba (en el caso de la geotermia no siempre se puede volver a reinyectar el fluido a la tierra):

$$P_{e,b} = Q v \Delta p / \eta_b$$

Donde: v_r es el volumen específico del fluido de trabajo dado en m^3/kg .

Δp Es la diferencia de presión entre bocas de aspiración e impulsión.

η_b es la eficiencia del grupo motobomba.

Todas las centrales existentes en el mundo usan este principio como fundamento y en donde se diferencian entre si, es en el aprovechamiento de la energía del fluido según las condiciones que se tenga en la boca de pozo y de la inversión económica requerida. Así tenemos cinco tipos de categorías:

- Vapor seco
- Flash simple
- Flash doble
- Ciclo binario
- Ciclo híbrido.

Se estudiarán de una manera más profunda los conceptos de las primeras cuatro tipos de centrales nombradas.

3.3.2 CICLO DE VAPOR SECO

En palabras técnica una central con ciclo de vapor seco es aquella que por las condiciones obtenidas en la boca del pozo, el fluido extraído está en estado de saturación o muchas veces ligeramente recalentado; esto es a temperaturas mayores a los 200°C.

Con este tipo de fluido, el ingreso del mismo a la turbina es directo ya que al estar en este estado no causa daño a la misma.

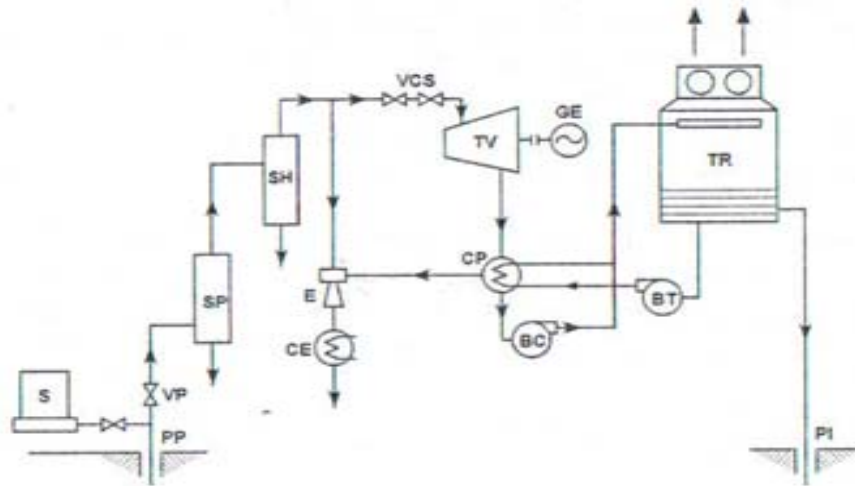
Cuando se tiene una central con este ciclo las ventajas son muchas como:

- Se puede alcanzar un mayor salto entálpico, dependiendo siempre y cuando se den unas condiciones aptas a la salida de la turbina.
- Menor cantidad o casi ninguna de separadores.
- Mayor aprovechamiento de la energía del fluido.
- Menor número de obras civiles, tuberías, instrumentos, etc.
- Reducción de la inversión económica.

Pero también tiene sus contras y estas están dadas básicamente por:

- Altas temperaturas, los aislamientos térmicos deben ser más gruesos y de mejor calidad de materiales.

- Normalmente a altas temperaturas se tienen muy altas presiones que vuelve al sistema muy peligroso.
- Por la alta velocidad con la que sale el fluido, este arrastra pequeñas partículas de rocas, arena y demás que deben ser eliminados.
- Grandes cantidades de emanaciones de gases como el ácido sulfhídrico que en pequeñas cantidades es muy venenoso.



PP, pozo productor.

S, silenciador.

VP, válvula principal de compuerta.

SP, separador de partículas.

SH, separador de humedad.

VCS, válvulas de control.

E, eyector de gases no condensables.

CE, condensador secundario.

TV, turbina de vapor.

GE, generador de electricidad.

CP, condensador principal.

BC, bomba centrífuga para envío del condensado a la torre de enfriamiento.

BT, bomba centrífuga para envío de la torre de enfriamiento al condensador.

TR, torre de enfriamiento de tiro forzado.

PI, pozo de reinyección.

Figura 3.4: Esquema de una central eléctrica con ciclo de vapor seco. [2]

Primer paso es el PP, la instalación de la boca de pozo de producción.

Segundo el fluido obtenido pasa por una válvula VP, pero si se libera el vapor a la atmosfera debe pasar primero por un silenciador S, esto es para disminuir la presión en las tuberías o cuando se tiene en mantenimiento la turbina.

Tercero, pasa por un separador de partículas sólidas SP, luego pasa por uno de humedad por las gotas que son arrastradas SH.

Cuarto se le hace circular al vapor limpio y seco por medio de tuberías aisladas térmicamente y se desprende un ramal que lleva a una parte del vapor a un eyector E con una corriente principal a la turbina, esto se hace para poder producir la depresión necesaria y requerida para el funcionamiento de los condensadores CE auxiliar y CP principal, esto es bajar la presión de ellos a menos que la atmosférica. Estas se alimentan a través de las válvulas de control y seguridad VCS.

Quinto el vapor llega a la turbina de condensación TV conectada al generador de electricidad GE y descarga el líquido en el condensador principal CP.

Sexto toda el agua condensada se lleva a una torre de enfriamiento TR por medio de bombas BC, para ser tratada, donde una parte se usa en el condensador enviado por una bomba BT y el resto se es reinyectado al acuífero por medio de un pozo de reinyección PI (*Figura 3.4*).

3.3.3 CICLO DE UNA SOLA Y DOBLE VAPORIZACIÓN INSTANTÁNEAS

Este tipo de centrales, son las más comunes ya que el estado de los fluidos en su gran mayoría se encuentra en una mezcla de agua-vapor a una presión que depende de la boca del pozo y a una temperatura según el grado de saturación del fluido. En términos numéricos las relaciones a de agua-vapor no deben ser muy altas, es decir entre 0.1 y 0.5; esto es la masa de vapor dividido para la suma de la masa de vapor más agua.

Cuando se tiene una mezcla a muy alta presión en la cabeza del pozo se la puede optimizar, sacarle mejor provecho mediante un sistema de doble flash, la diferencia con la de una sola vaporización instantánea radica en que se usa un sistema de dos flash y una turbina de dos etapas.

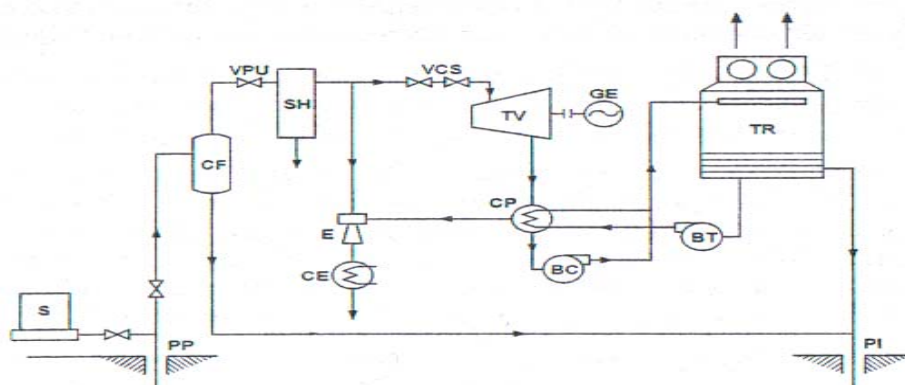
Las ventajas de usar estos sistemas son:

- Son los más comunes en el mundo, lo cual hace que la tecnología esta más desarrollada y haya modelos a seguir.

- Son versátiles pueden sacarle mayor provecho a la mezcla de vapor-agua usando uno o dos flash dependiendo de la presión y grado de saturación de la mezcla.
- Estos sistemas consumen tres veces menos un caudal másico que de la central de vapor seco, siempre y cuando estén a la misma temperatura y presión.

Las desventajas son:

- Que el costo de estas centrales es mucho mayor en algunos casos que las de vapor seco debido a que no se puede conducir directamente la mezcla a la turbina, debe pasar por una serie de separadores, que son del tipo ciclónico (cámara de flash).
- El consumo unitario de una central de flash es mucho mayor que una de vapor seco.



PP, pozo productor.

S, silenciador.

VPU, válvula principal de compuerta.

CF, cámara de flashing (cicloide)

SH, separador de humedad.

E, eyector de gases no condensables.

CE, condensador secundario.

TV, turbina de vapor.

GE, generador de electricidad.

CP, condensador principal.

BC, bomba centrífuga para envío del condensado a la torre de enfriamiento.

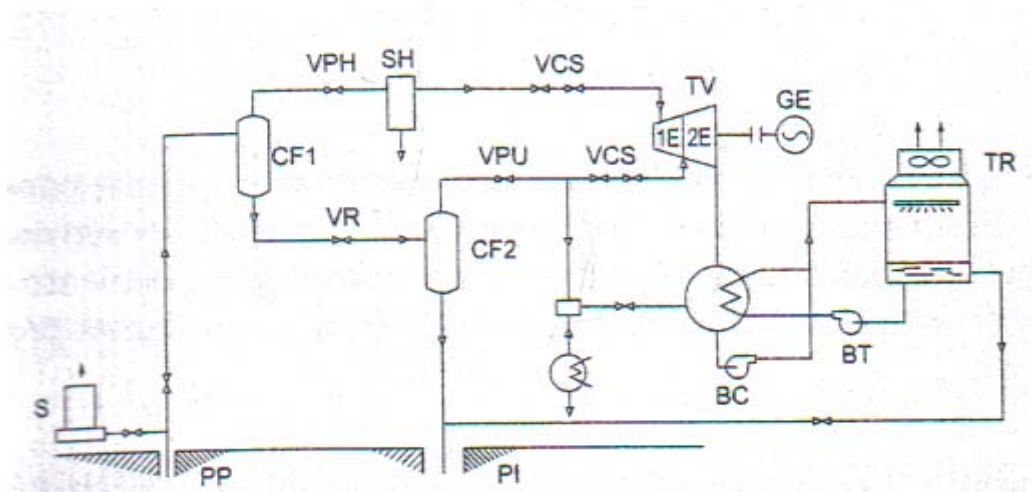
BT, bomba centrífuga para envío de la torre de enfriamiento al condensador.

TR, torre de enfriamiento de tiro forzado.

Figura 3.5 Esquema de una central eléctrica con ciclo de simple vaporización instantánea (flash). [2]

Primer paso es separar la parte húmeda del fluido usando un separador ciclónico con cámara de flash (CF). Esto es por medio del principio de diferencias de densidades donde el vapor sube y la parte húmeda se va hacia la parte inferior del separador, con una eficiencia muy alta proporcionando un vapor casi seco.(figura 3.5)

Después se siguen los mismos procesos ya descritos en la figura 3.4 con la diferencia que la masa de agua separada se la vuelve a utilizar para re-inyectar al suelo en usos de intercambio de calor,



PP, pozo productor.

S, silenciador.

VPH, válvula principal de compuerta.

CF1, cámara de flashing (cicloide)

SH, separador de humedad.

VR, válvulas de retención.

VCS, válvulas de control.

CF2, cámara de flashing (cicloide)

E, eyector de gases no condensables.

CE, condensador secundario.

TV, turbina de vapor de dos etapas.

GE, generador de electricidad.

CP, condensador principal.

BC, bomba centrífuga para envío del condensado a la torre de enfriamiento.

BT, bomba centrífuga para envío de la torre de enfriamiento al condensador.

TR, torre de enfriamiento de tiro forzado.

PI, pozo de reinyección.

Figura 3.6 Esquema de una central eléctrica con ciclo de doble vaporización instantánea (flash). [2]

3.3.4 CICLO DE UN FLUIDO BINARIO.

Este tipo de centrales se fundamentan en no usar en forma directa el fluido del agua termal y a su vez utilizar un fluido de trabajo, distinto al agua para que se acomode a las necesidades requeridas.

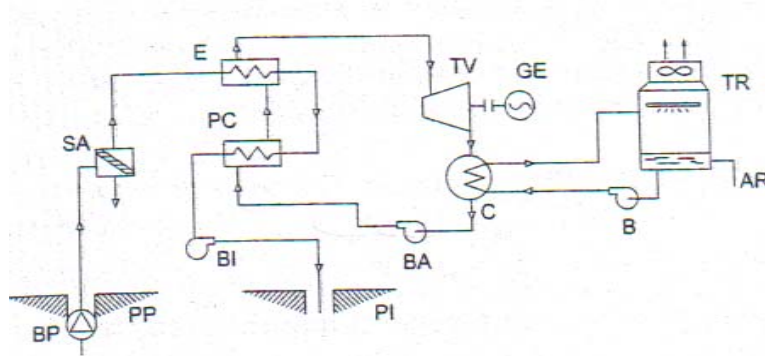
Sigue siendo un ciclo Rankine donde el primer fluido aporta calor al segundo, el mismo que se lo usa para el trabajo, esto es mediante un intercambiador de calor.

Las ventajas de este tipo de sistema son:

- No están limitadas por las condiciones de presión y entalpía altas para generar energía eléctrica.
- Al no usar directamente el fluido del pozo, se evita el tener que limpiar o separar todas las sales, minerales y demás gases que contiene dicha sustancia antes de ingresar a la turbina.
- El fluido de trabajo está a una temperatura de unos 150°C para la fuente caliente y a unos 35°C para el sumidero térmico, los fluidos más usados son propano, n-butano, isobutano, isopentano y refrigerante R-114.

Las desventajas son:

- Los costos de operación, mantenimiento y producción son más elevados que los de las ya mencionadas por utilizar un fluido de trabajo especial.
- Si bien se dejan a un lado los separadores, se incrementan los intercambiadores de calor, y bombas, por lo cual el sistema se vuelve más complejo.
- En muchos casos para mejorar la eficiencia del sistema se usan dos distintos tipos de refrigerantes, lo cual hace que cada vez se vaya complicando más el sistema.



PP, pozo productor.

BC, bomba sumergida.

SA, sistema de limpieza.

E, evaporador.

PC, sistema de intercambiadores de calor.

BI, bomba centrífuga para inyección del fluido.

BA, bomba centrífuga para envío del binario.

TV, turbina de vapor.

GE, generador de electricidad.

C, condensador principal.

BC, bomba centrífuga para envío del condensado a la torre de enfriamiento.

BT, bomba centrífuga para envío de la torre de enfriamiento al condensador.

TR, torre de enfriamiento de tiro forzado.

PI, pozo de reinyección.

Figura 3.7 Esquema de una central eléctrica con ciclo binario. [2]

Aquí aparecen nuevos elementos que a diferencia de los otros casos expuestos, son el evaporador (E), para transmitir el calor del fluido obtenido de la tierra al de trabajo; el precalentador (PC), para que el fluido de trabajo gane calor en una primera etapa; Mayor cantidad de bombas para mover el fluido de trabajo.

3.4 EFICIENCIA DE LAS PLANTAS GEOTÉRMICAS

En general podemos decir que el rendimiento dependerá:

- De la temperatura del fluido geotérmico en la cabecera del pozo.
- Del tamaño de la planta.
- De la tecnología utilizada

En otras palabras dependen del mecanismo en sí, las pérdidas de calor, etc. Esto es porque en sí las plantas geotérmicas son máquinas térmicas sujetas a la eficiencia máxima de Carnot (⁹)

En cuanto a temperaturas:

- Pozos con temperaturas alrededor de los 210°C se obtienen rendimientos brutos entre el 50% y 60%, y netos entre 45% y 55%.
- Para pozos con temperaturas alrededor de los 170°C el rendimiento neto cae hasta un 10%.
- Para pozos con temperaturas alrededor de los 100 °C el rendimiento neto llega a valores tan bajos como el 6%.

En términos de consumo específico, esto es el coeficiente entre el caudal del fluido térmico y la potencia eléctrica generada por la central, expresado en kg de vapor consumidos por Kwh eléctrico generado, así tenemos:

- Para una central con un fluido de vapor seco con alta temperatura, el consumo neto se encuentra alrededor de los 8 kg/kwh.
- Para una central con un fluido de trabajo a una temperatura alrededor de los 100 °C, de bajo rendimiento, el consumo neto llega hasta los 460 kg/kwh.

Un ejemplo de esto es que para una central de 100MW consumirá alrededor de 1500t/h de vapor y para ello se necesitarán alrededor de 20 a 50 pozos normales de producción.

En cuanto a tamaño, para pequeñas centrales eléctricas geotérmicas muchos autores consideran más viables centrales hasta los 5 MW, que las de elevadas potencias por las siguientes razones:

- Se puede construir en módulos de baja potencia de 100 a 300 kW, por el volumen reducido que ocupan.
- Se adaptan de mejor manera a una central binaria a temperaturas entre 100 a 150°C y a las de flash de 150°C.

⁹ Carnot, es una máquina perfecta, es decir, convierte la máxima energía térmica en trabajo mecánico.

- Son muy flexibles, pueden trabajar al 25% de su potencia nominal en buenas condiciones y trabajar en isla, alimentando a un pequeño consumidor no conectado a la red.
- Son diseñadas con un alto nivel de control automático, reduciendo al mínimo la atención exigida para su funcionamiento.
- La inversión en accesorios como tuberías de transporte del fluido geotérmico es pequeña, ya que a la central se la localiza en la boca el pozo.
- Los costos de inversión son menores.
- Se estima que para sea rentable una potencia mínima a partir de energía geotérmica sea de 10MW.

Es decir para la potencia eléctrica neta generada por el sistema será la diferencia entre lo generado por la turbina y lo gastado en el consumo interno:

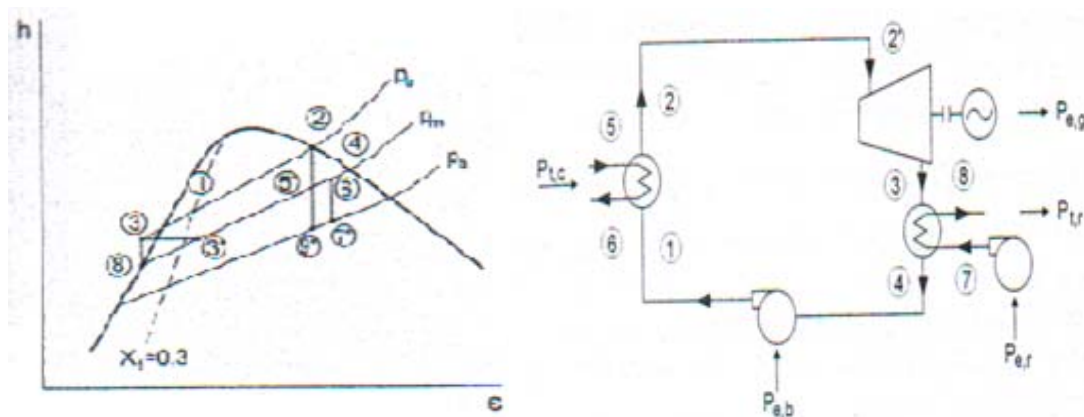


Figura 3.8 Grafica del proceso entalpia- entropía y Esquema del Ciclo Rankine más real, simple [5]

$$P_{e,neto} = P_{e,g} - (P_{e,b} + P_{e,r} + P_{e,aux}) \quad (10)$$

El rendimiento bruto del ciclo es la relación entre la energía eléctrica generada y la aportada por el fluido de trabajo:

¹⁰ Potencia eléctrica neta generada por un sistema de turbina dentro de un sistema del ciclo Rankine más detalle [2]

$$\eta_{bruto} = \frac{P_{e,g}}{P_{t,c}} \quad \eta_{bruto} = \eta_i \eta_m \eta_e \frac{Q(h_2 - h_3)}{Q_c(h_5 - h_6)} \quad (11)$$

y un rendimiento neto como:

$$\eta_{neto} = \frac{P_{e,g} - (P_{e,b} + P_{e,r} + P_{e,aux})}{P_{t,c}}$$

$$\eta_{neto} = \eta_i \eta_m \eta_e \frac{Q(h_2 - h_3)}{P_{t,c}} - \frac{(P_{e,b} + P_{e,r} + P_{e,aux})}{P_{t,c}} \quad (12)$$

$P_{e,neto}$, es la potencia eléctrica neta generada.

$P_{e,g}$, es la potencia eléctrica generada en los bornes del generador.

$P_{e,b}$, es la potencia eléctrica requerida o gastada por las bombas para hacer circular el agua de enfriamiento.

$P_{e,r}$, es la potencia eléctrica requerida o gastada por los ventiladores si se tiene una torre de enfriamiento de tiro forzado.

$P_{e,aux}$, es la potencia eléctrica consumida en equipos auxiliares como bombeo de agua caliente (Q_c), iluminación, sistema de control, etc.

η_{bruto} , Rendimiento bruto de un sistema cerrado del ciclo Rankine.

$P_{e,g}$, es la potencia eléctrica generada en los bornes del generador.

$P_{t,c}$, es la potencia cedida o dada al fluido para calentarse por medio de una caldera, en el caso de la geotermia es por medio del calor del suelo en el yacimiento.

η_i , Rendimiento interno de la turbina.

η_m , Rendimiento mecánico de la turbina.

η_e , Rendimiento eléctrico del generador.

¹¹ Rendimiento bruto de un sistema cerrado del ciclo Rankine más detalle [2]

¹² Rendimiento neto de un sistema cerrado del ciclo Rankine más detalle [2]

Q_c , Caudal de la mezcla al ingreso del sistema.

Q_c , Caudal de vapor que ingresa a la turbina.

$h_2 - h_3$, diferencia de entalpías correspondientes a los puntos al ingreso y a la salida del fluido al pasar por la turbina.

$h_5 - h_6$, diferencia de entalpías correspondientes a los puntos al ingreso y a la salida del fluido por el yacimiento.

También puede definirse el ciclo utilizando el concepto de energía interna en lugar de la entalpía, teniendo así:

$$\eta_{bruto} = \frac{P_{e,g}}{Q(e_i - e_o)} \quad (13)$$

$$\eta_{bruto} = \frac{P_{e,g}}{Q[(h_i + T_i s_i) - (h_o + T_o s_o)]}$$

Donde:

e, energía interna específica del fluido de trabajo

h, entalpía específica del fluido de trabajo

s, entropía específica del fluido de trabajo

T, temperatura absoluta

Subíndice *i*, condiciones a la boca del pozo

Subíndice *o*, condiciones del condensador o sumidero térmico

3.5 TRATAMIENTO A LOS FLUIDOS GEOTÉRMICOS.

3.5.1 SOBRECALENTADO

Existe la posibilidad de mejorar teóricamente la eficiencia de las turbinas geotérmicas utilizando combustible adicional para proporcionar un alto grado de sobrecalentamiento al vapor antes de que este llegue a las turbinas, ya que las características de presión y temperatura son relativamente bajas en los campos geotérmicos. La ventaja adicional de proporcionar un vapor más seco a la turbinas reduciría la erosión de los álabes, permitiría además velocidades

¹³ Rendimiento bruto de un sistema cerrado del ciclo Rankine pero usando como base la energía interna, más detalle [2]

mayores en las puntas y una mayor producción de energía por turbinas sin tomar en cuenta el tipo de las mismas. Lo dicho anteriormente se consideró en la etapa de diseño, pero bajo condiciones que prevalecían dejar en claro un caso económico muy dudoso a favor del sobrecalentamiento a base de combustible y en todo caso únicamente para fines de sobrecarga, por tal motivo dicha idea no prosiguió.

En la actualidad se ha cancelado de forma permanente todas aquellas ideas relacionadas con el sobrecalentamiento a base de combustible.

3.5.2 SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE CORROSIÓN E INCRUSTACIÓN

Las condiciones más severas de corrosión dentro de una central geotérmica se presentan en los condensadores y en el equipo de extracción de los gases no condensables, el oxígeno, los gases y el vapor de agua todos mezclados en los condensadores de contacto directo hacen que esta mezcla sea muy corrosiva, por lo cual estos elementos se deben proteger con resinas que son muy diversas y patentadas, o sino con una capa de aspersión de aluminio para colocarse en la pared interior de los mismos. Para los rotores de extracción de gases se usa aceros inoxidable austeníticos y los interenfriadores se los hacen con aluminio al 99.5% para resistir al vapor geotérmico hasta temperaturas no muy elevadas y caso contrario a temperaturas muy fría el ataque corrosivo se enfocaría en los rotores de extracción.

La corrosión en juntas de expansión es casi nula, porque son hechas de acero inoxidable, el problema se presentaría si el vapor contiene cantidades de oxígeno y cloruros, el primero en este tipo de tuberías es casi imposible que se de porque son herméticamente selladas y el segundo si se puede dar y para evitar este problema se debe limpiar mediante lavados con agua fresca. Cuando se vaya a realizar mantenimiento se debe tener cuidado de que todas las juntas estén limpias antes de sacarlas y dejarlas en contacto con el aire ya que ahí si puede darse la acción del oxígeno sobre ellas produciendo corrosión.

En los alabes la corrosión es casi imperceptible al igual que en la juntas si se los construye con los materiales adecuados (ver sección 5.1.3) y solo cuando por algún motivo se pare la producción se debe colocar un soplador que saque

los residuos de gases del interior de las tuberías y turbina para evitar que el aire ingrese por los sitios de mantenimiento o reposición y así no se produzcan reacciones químicas con dichos gases que produzcan corrosión.

En algunas ocasiones los fluidos termales son tan corrosivos que requieren del empleo de una tubería de ademe (ver en la sección 2.3.1.2) de acero especial resistente así como de materiales especiales para el equipo superficial (ver 2.3.2.1). Si este fluido es muy corrosivo se puede llegar abandonar el pozo y hasta en ocasiones toda el área.

La corrosión externa también es un problema generado por el exceso de ácido sulfhídrico en la atmósfera (ver sección 3.6.2)

La presencia de aire no sólo ocasiona pérdidas de calor, sino que al ser absorbido por el agua puede ocasionar corrosiones en el sistema de vapor. A pesar de que la función del tanque desaireador del agua de alimentación es la de extraer el aire disuelto, en la forma más efectiva posible, es conveniente que el condensador descargue el condensado conteniendo tan poca cantidad de aire disuelto como sea posible.

Las torres de enfriamiento también sufre de los ataques de la corrosión por medio de los sulfatos que son arrastrados por los gases del pozo al condensador y al agua de la torre de enfriamiento, ocasionando problemas en las zonas que contengan concreto; la solución es introducir agua alcalina de río o de otra fuente, o bien se suministra como en USA una protección de epóxico de alquitrán de carbón para contrarrestar el riesgo mencionado.

La erosión en las tuberías de transporte es un problema generado por la expulsión de arena y de partículas de rocas grandes que se desprende de las paredes del pozo conduciendo así a una fractura y descontrol de la misma. La solución a este problema es usar la tubería de ademes ranurados o bien aceros especiales de gran resistencia

Otra forma de corrosión frecuente en estos componentes es la erosión-corrosión normalmente asociada a altas velocidades de flujo. Este tipo de ataque trae aparejado un fuerte aumento de la velocidad de corrosión atribuible

al efecto de la remoción mecánica de la película protectora, al aumento en la transferencia de masa, o a la acción simultánea de ambas.

La acidez que contienen las aguas geotérmicas es un factor muy importante a ser analizado en una central geotérmica debido al índice de corrosión que dichas aguas generan; esto se debe porque las aguas muchas veces como en Japón son muy acidas con pH de 5 y en otros casos como Nueva Zelanda es base con un pH de 8.6.

Si el valor del pH es muy bajo se deberá usar un material en el sistema de tuberías que sea lo bastante combativo, porque caso contrario la explotación del yacimiento no será posible.

Corrosión por depósitos químicos:

- Calcita que ataca especialmente a la tubería de extorción con la consecuencia de reducir la cantidad de vapor explotado.
- Sílice, está acumulación de sílice se da en las tuberías que llevan el fluido térmico a una temperatura muy baja, como son en las tuberías de desecho con la consecuencia que estas aguas llevan el sílice nuevamente al interior de la tierra tapando las fracturas naturales entre rocas que son de transmisión de calor.
- Químicos duros, estos se producen cuando las centrales generadoras están relativamente muy cerca a los pozos productores y las purgas no han sido eficaces en la limpieza de las tubería lo cual genera una acumulación de compuestos solubles cuando baja la temperatura por expansión del fluido en el interior de la turbina y por consiguiente generan problemas en el equilibrio dinámico y el rendimiento mismo de la turbina.
- Sulfuro de hierro, sobre el acero genera una capa protectora contra el ataque ulterior, pero en algunos casos se ha visto que no es suficiente protección como en Nueva Zelanda donde aparecieron películas cristalinas de magnetita de 3 mm de espesor, pero esto se dio en las tuberías donde no se encontró residuos de sílice por una extrema limpieza de purgas y tuberías.

La solución para la gran mayoría de estos depósitos químicos es el inyectar cantidades pequeñas de agua de pozo con el fin de diluirlas y poderlas recoger por medio de las purgas, pero se debe tener mucho cuidado en que no vaya a pasar dicha cantidad de agua a las turbinas.

A continuación se dan a conocer las sustancias que generan un efecto negativo sobre las instalaciones en una central geotérmica:

Tabla 3.4 Principales sustancias corrosivas o incrustantes presentes en las aguas termales.

Sustancia	Efecto principal	Estado
Hidrógeno	Corrosión	Iónico
Cloruros	Corrosión	Sólido
Sulfuro de hidrógeno	Corrosión	Gas
Dióxido de carbono	Corrosión	Gas
Amoníaco	Corrosión	Gas
Sulfuros	Corrosión	Sólido
Oxígeno	Corrosión	Gas
Metales de transición	Corrosión	Sólido
Silicatos	Incrustaciones	Sólido
Carbonatos	Incrustaciones	Sólido
Sulfatos	Incrustaciones	Sólido
Óxidos	Incrustaciones	Sólido

Fuente: Según la American Society of Heating, refrigerating and Air Conditioning Engineers, Handbook, 1983.

3.6. ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES

3.6.1 GENERALIDADES

Nuestro planeta es lleno de vida por cualquier lugar que se vea, pero ésta fuente está siendo amenazada por los diferentes tipos de contaminación, en mares, ríos, aire, suelo, etc. Durante mucho tiempo ha venido sufriendo un constante cambio es todo su entorno, durante el siglo XXI el cambio climático se ha ido acelerando de forma exponencial a tal punto que los países más desarrollados se han reunido para dar soluciones a dichos cambios. Se sabe que la mayor fuente de contaminación es la producida por los combustibles fósiles y sus derivados para los diferentes usos que la humanidad les da como: combustibles, energía, transporte, etc. Es aquí que cuando se habla de

generación de energía en base a fósiles, que las energías limpias o renovables toman cada más fuerza; desde los años 50 se han hecho grandes estudios sobre ellas, como el caso de la geotermia, que alrededor del mundo ha sido desarrollada lentamente y que en Sudamérica poco explotada está.

Hay registros desde los años 70 sobre los diversos riegos y problemas medioambientales que generaron las centrales geotérmicas, como son la contaminación del aire, suelo y agua. Hoy en día este tipo de contaminación no es permitida por lo cual la explotación de la geotermia se volvió mas una energía complementaria y si solo si, es muy necesaria.

El gran problema de la contaminación es que por más que se busque soluciones a la generación, transporte y de más usos, es que la demanda por estos es cada vez mayor, ya que aproximadamente nacen 160 seres humanos por minuto, la gente necesita lugares para vivir y alimentarse, es por ello que grandes extensiones de bosques y junglas (filtros naturales) están siendo desbastadas a un ritmo nunca antes visto. Las ciudades crecen cada año, los bosques y áreas verdes son remplazados por una jungla de cemento, acero y vidrio. En algunos lugares como en Dubái, se ha llegado a construir islas artificiales ocupando grandes extensiones marinas llenas de vida.

3.6.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

3.6.1.a Ventajas:

- En general la generación de energía por medio de la geotermia es menos contaminante que la generada por combustibles y en otras aplicaciones puede ser totalmente limpia si se invierte moderadamente en resolver los problemas contaminantes. En otras palabras disminuye el deterioro ambiental del planeta. Las centrales geotérmicas a comparación de las térmicas reducen significativamente las emisiones de CO₂, COX, NO_x y demás residuos característicos de la combustión de combustible fósiles, en consecuencia una disminución considerable del efecto invernadero, 1/6 del dióxido de carbono producido por una planta de gas natural. Estudios indican que actualmente se liberan 22 millones de toneladas de CO₂, 200 mil toneladas de óxidos de nitrógeno

y 110 mil toneladas de material particulado por quema de combustible, que podrían reducirse por el uso de esta tecnología. En la actualidad se tienen un factor de reducción de toneladas de CO₂ de 0.754 tCO₂/MWh por año

3.7.2.b Desventajas:

Las desventajas de las centrales geotérmicas se encuentran determinadas en cuatro aspectos:

- Contaminación de aire: por ácido sulfhídrico (H₂S), letal en pequeñas proporciones, normalmente se ubica en sótanos nos partes cerradas; dióxido de carbono (CO₂) que a pesar de ser descargado a la atmósfera en menor cantidad que las termoeléctricas es un gas no condensable que afecta al calentamiento global; otros venenos contenidos en el aire, como compuestos con mercurio, arsénico y elementos radioactivos que afectan a la salud y vida de los seres vivos; escape de vapor en grandes cantidades originadas por las torres de enfriamiento, silenciadores o válvulas de escape, son un problema solo si la central se encuentra ubicada en zonas húmedas, ya que impide la visibilidad en la zona y aumenta la nubosidad de la misma.
- Contaminación del suelo: la concentración de sílice por medio de la reinyección afecta la permeabilidad del acuífero; la erosión del suelo en zonas muy poco forestadas con grandes quebradas o con un suelo muy irregular y seco, al momento de realizar la nivelación del terreno para la construcción de la central, tuberías y accesos genera una mayor deforestación zonal; aparecimiento de hundimientos cuando se hace una gran extracción del fluido geotérmico y con el pasar del tiempo el terreno comienza a hundirse con lo cual introducen esfuerzos en las tuberías y estructuras que se encuentran sobre ellas; sismicidad, en toda zona donde se construyen centrales geotérmicas debido a la explotación de los campos se produce una inestabilidad en el subsuelo con evidencias sísmicas.

- Contaminación del agua: todo gas no condensable liberado en el agua, como los venenos producidos por los compuestos de boro, arsénico, amoníaco y mercurio, afectan directamente a la vida acuática.
- Otros problemas: contaminación por calor, este el mayor problema que se tiene q afrontar en las centrales geotérmicas, ya que además de ser un contaminante es un desperdicio de calor, por lo tanto, pérdida de dinero; ruido, es producido por el vapor liberado hacia la atmósfera, el cual se encuentra en excesivo nivel sonoro produce deterioro en el sistema auditivo; deterioro del paisaje, esto es muy difícil de medir con precisión cuanto afecta la construcción de las centrales a la belleza natural del entorno, siempre van a existir opositores radicales a la construcción de la misma y por otro lado la necesidad de solventar la deficiencia energética, muchas zonas son una fuente turística por lo cual se debe hacer estudios exhaustivos si la cantidad de energía que se obtienen del campo geotérmico explotado más todo el deterioro ambiental justifica el costo de producción de energía y el mejoramiento de sistema socio-económico del área de influencia. Un caso es el parque Yellowstone donde no se permitió la explotación de este recurso y se prefirió mantenerlo como fuente natural para la vida silvestre, el turismo y la recreación.
- Leyes; no existe en el Ministerio de Ambiente una ley o serie de normas estrictas para la utilización de fluidos geotérmicos, y mucho menos para las generación eléctrica por medio de centrales geotérmicas. Las únicas leyes que reposan en dicho ministerio son para centrales térmicas e hidroeléctricas. Tampoco existe una ley que promulgue el desarrollo de las energías renovables, solo condena el hecho de la contaminación y trata de proteger las áreas o zonas endémicas.

3.6.3 REINYECCIÓN

La manera en que los fluidos reinyectados fluyen hacia el acuífero puede ser de manera directa e indirecta, por lo cual es necesario la consulta con un hidrólogo, para que él la determine; en muchos casos el agua reinyectada fluye desde abajo de los pozos productores y no desde sus orillas; en Ahuachapán demostraron que la interferencia directa no sería un problema, esto se obtuvo

por medio de las pruebas realizadas con pozos más profundos que los productores y mediante trazadores; el resultado fue que solo en el 1% de los trazadores se encontró que había ingresado al pozo productor, el cual estaba a más de 400m de separación.

Otro hecho encontrado a través de la experimentación es que en la mayoría de los casos donde se a reinyectado el fluido ha sido sin bombas, simplemente por gravedad con muy buenos resultados.

En la actualidad hay muchos lugares en los que se está reinyectando, El Salvador, Estados Unidos, Francia y Japón. En México y Nueva Zelanda se han hecho pruebas para su posible implementación.

Solo en las siguientes ocasiones se podría decir que la reinyección no es apta a ser implementa o que imposibilitan la adopción de la misma, esto viene dado por condiciones especiales locales como:

- Exceso de sólidos en disolución.
- Baja permeabilidad subterránea.

A parte de reciclar agua también se logra reciclar calor, el cual fue ilustrado por Einarson en la figura 3.10; el propósito de este análisis es la reducción de la cantidad de calor extraída del yacimiento como también la cantidad de carga.

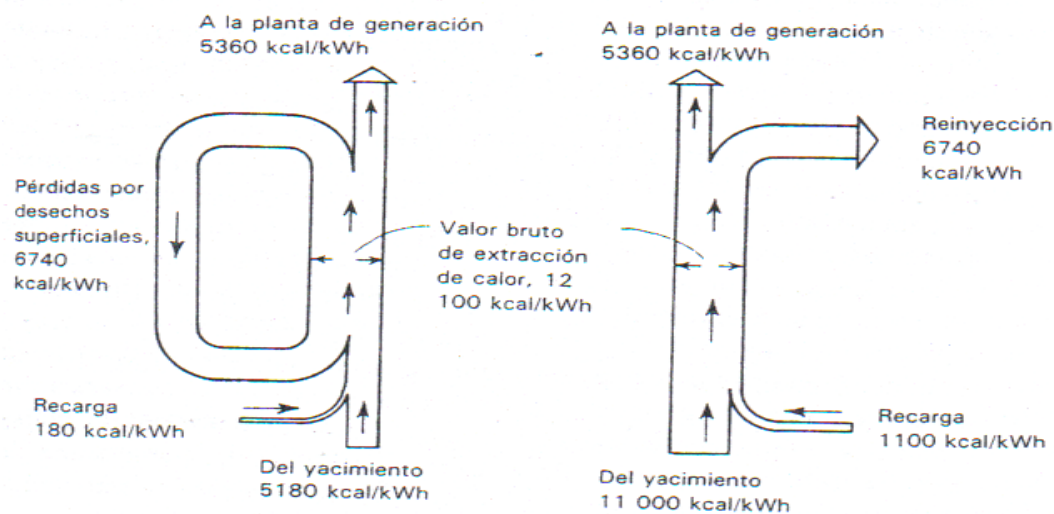


Figura 3.9 Interpretación con y sin reinyección en el campo de Ahuachapán de El Salvador: Balances de energía del yacimiento para un

campo de agua dominante. a) Vaporización de una etapa con reinyección; b) Vaporización de una etapa con desecho superficial del fluido. [2]

3.6.4 ECOLOGÍA

Como ya se hablo en las desventajas de las centrales geotérmicas en cuanto al medio ambiente en el punto anterior muchos efectos como la variación de temperatura en el agua, la descarga de grandes cantidades de vapor, la liberación de sustancia dañinas para los ecosistemas propios de las zonas de influencia hacen que los se generen efectos directos en la fauna y flora de las mismas; recién están siendo estudiados en Nueva Zelanda y Estados Unidos.

No siempre se verán afectadas la flora y fauna local de la misma manera, y es por ello que importante que tanto los ecologistas como los ingenieros realicen estudios más exhaustivos para demostrar como todos estos efectos de la generación eléctrica por medio de la geotermia afectan a la fauna y flora. Un estudio que se realizó en California en acción positiva hacia la naturaleza, ha sido la siembra de semillas de pinos híbridos, los cuales tienen la capacidad de sobrevivir en zonas con pendientes fuertes y en suelos de mala calidad como en atmosferas con gran cantidad de acido sulfhídrico.

3.6.5 SITUACIÓN MEDIO AMBIENTAL EN CHACHIMBIRO

La Escuela Politécnica del Ejército conformó un equipo de trabajo de campo, los cuales se plantearon objetivos generales y particulares donde determinaron la línea base ambiental, de acuerdo con sus variables representativas en el área geotérmica de Chachimbiro, caracterizado cualitativamente la fauna y la flora del lugar con lo que obtuvieron resultados cualitativos y cuantitativos de la flora y fauna, los cuales están en el documento presentado con el título” LINEA BASE AMBIENTAL Y SOCIAL PARA EL AREA GEOTERMICA DE CHACHIMBIRO” por el equipo antes mencionado de la Escuela Politécnica del Ejército. ⁽¹⁴⁾

Luego de identificar los posibles efectos medio ambientales que pueden surgir y que han pasado en centrales con características geotérmicas similares a las de Chachimbiro, también se identifico el ecosistema precedente en dicha zona;

¹⁴ Ver con detalle el informe en la referencia 28

con lo cual podemos señalar y adelantarnos a deducir los siguientes aspectos medio ambientales:

- Es importante recalcar que para las pruebas iniciales que se realizan en los pozos geotérmicos con el fin de caracterizar el mismo, no se puede y no se debe extraer los fluidos geotérmicos, sin haber primero tomado las seguridades medio ambientales pertinentes. La expresión "veremos lo pasa", con la cual los primeros estudiosos y científicos trabajaban en la exploración y explotación de los campos geotérmicos, hoy en día no es de ninguna manera una forma responsable, ética y moral de generar electricidad por medio de una energía "limpia".
- En el Ecuador a pesar de no constar con una ley para la explotación de los recursos geotérmicos y mucho menos para el control y seguimiento de los efectos dañinos que estos recursos producen al medio ambiente una vez extraídos del subsuelo; está en la conciencia y en la ética profesional de quienes realicen dicha actividad de cuidar y proteger primero y ante todo el medio ambiente que los rodea. A diferencia de lo que no se tiene en el Ecuador, en países como Estados Unidos hay leyes muy estrictas contra la contaminación y un verdadero programa de impulso a su cumplimiento en todas las centrales de generación con geotermia, como en la de los Geiseros, donde son aplicadas tanto en instalaciones nuevas como en las ya construidas; a tal punto que esto ha hecho reducir la producción y que las centrales antiguas se paralicen, pierdan dinero y dejen de ser lo económicamente rentables que antes eran. Como este caso hay varios en Latinoamérica, Costa Rica, El Salvador (todos en producción) que ya poseen una ley; en Chile, Colombia y Argentina aún no se tiene producción pero sí un primer borrador de dicha ley.
- Al tener una central de flasheo simple o doble, es importante tomar en cuenta que la cantidad de vapor que se desaloja hacia la atmósfera por medio de válvulas de alivio, escape y por las torres de enfriamiento, tiene una influencia directa en el clima del lugar produciendo nubosidad, neblinas y formación rápida de hielo; en la zona de Chachimbiro el

problema sería poco grave por ser una zona seca a temperaturas entre 20 a 22 °C y con escasas precipitaciones, por que al ser una zona seca el vapor de agua liberado se dispersa rápidamente.

- En cuanto al efecto de sismicidad al no tener reportes concretos en centrales de líquido dominaste, este no constituye una amenaza.
- El problema del ruido es tratable y en su mayoría han causado efectos poco significativos por no ser ruidos permanentes; y de serlo, son contenidos por medio de materiales acústicos especiales.
- Para evitar los efectos como: venenos contenidos en el agua y contaminación por calor, así como la mitigación: del ruido, hundimientos, escape de vapor, deterioro del paisaje y problemas en la ecología del lugar, la reinyección de los fluidos geotérmicos al terreno nuevamente una vez ya utilizados, es una solución probada en otras partes del mundo con gran éxito, por ello es imprescindible hablar de ella en la Central de Chachimbiro, cualquiera que fuese su proceso.
- La cantidad de ácido sulfhídrico que se obtenga de los pozos productores deberán ser tratados por medio del abatimiento u otro tipo de solución. Para los venenos contenidos en el agua, como compuestos con boro, arsénico, amoníaco y mercurios, o también aguas salinas; que una vez utilizados se de evitar a toda costa el que se los libere en ríos o lagos que son par riego, cría de peses o bien consumo humano, ya que pueden ocasionar efectos muy adversos en ellos. Las comunidades dentro del área de estudio presentan en la actualidad problemas de contaminación de las aguas en los ríos y las quebradas, debido al déficit de infraestructura de saneamiento ambiental y a la falta de tratamiento de las agua negras y desechos sólidos arrojados a ríos y quebradas.
- En cuando al aire, las centrales geotérmicas como se explico en punto 3.6.2 emanan grandes cantidades de CO₂ y venenos contenidos en el aire como: compuestos de mercurio, arsénico y elementos radiactivos como también sustancias nocivas como polvo de roca y rocío de sílice. Especialmente cuando se está iniciando con la producción de un nuevo

campo hasta que pasen los periodos de pruebas, puede pasar que se produzcan escapes de estas sustancias perjudicando radicalmente a las diversas especies de flora como las bromelias y a especies de la fauna como las aves de rapiña ya nombradas.

- Para el suelo de la zona de Chachimbiro, que en su mayoría es limo arenoso y limo arcilloso con una topografía irregular de 60% conformada de pendientes, más la tala indiscriminada y la quema por parte de los campesinos de la zona han contribuido a la erosión del suelo; sí a estos problemas le sumamos los efectos producidos por la explotación de los recursos geotérmico como hundimientos, erosión propia, deslaves y deterioro del paisaje (por la construcción de las vías de acceso y compactación de tierra para el establecimiento), hacen que sea el principal problema medio ambiental a ser tratado con estudios profundos y soluciones concretas poniendo en riesgo la factibilidad de una central geotérmica en dicha zona.

3.7 ASPECTOS SOCIALES

3.7.1 GENERALIDADES

Es muy importante identificar los efectos previsibles directos o indirectos que un proyecto geotérmico puede tener en las condiciones de vida de una población, estos pueden ser tanto aspectos positivos como negativos para el desarrollo de estas poblaciones.

En la Planta Geotérmica de Miravalles (Costa Rica), se realizaron Estudios de Impacto Social en cada una de sus tres fases, presentándose mejoras y mayor control representativas en la tercera etapa (Miravalles III), en donde se encuentran dos centros poblacionales importantes, con aproximadamente 5447 habitantes. Debido a las actividades del proyecto se han incrementado el desarrollo económico de la zona por medio de la creación de nuevas fuentes de empleo que pueden variar dependiendo de la fase de desarrollo que se encontraba el proyecto, alcanzando un máximo de 1800 hombres en la construcción de su primera etapa. De esta manera se ha aumentado la

actividad en el sector terciario específicamente en actividades comerciales, servicios e infraestructura de las poblaciones.

Con la construcción de nuevas carreteras hacia los poblados de la región, se trata de incentivar a las poblaciones cercanas a Miravalles III, en no descuidar su medio de subsistencia habitual (agricultura), ya que durante el desarrollo del proyecto se presenta una disminución en las actividades agropecuarias; además fomentar programas de desarrollo al que puedan acceder los trabajadores desempleados en la últimas fases de desarrollo del proyecto, evitándose crear una desestabilización social. Se incrementará la demanda de servicios públicos existentes, no solo por las necesidades del proyecto, sino también por la presencia eventual de mayor población. ⁽¹⁵⁾

Por otro lado, en la Planta Geotérmica de Ahuachapan (El Salvador) se creó una verdadera responsabilidad social, mediante el proyecto denominado “Vecino Responsable”, el mismo que permite viabilizar de esta forma elementos de gestión de operación, tanto al interior como al exterior del proyecto. Por este medio se participa promoviendo y contribuyendo al desarrollo local a través de los programas de los gobiernos locales o de otras instituciones que ejecutan planes de desarrollo dentro de la áreas de influencia de su operación, participando en programas de desarrollo de infraestructura de interés social, protección del medio ambiente y promoción y gestión de proyectos productivos; y así de esta manera lograr mantener una relación equilibrada, armónica y constructiva con las comunidades vecinas. ⁽¹⁶⁾

3.7.2 ANÁLISIS SOCIAL EN LA ZONA DE INFLUENCIA

3.7.2.1 Aspectos Sociales relevantes para el proyecto

Las manifestaciones geotermales más conocidas se encuentran en el área de Chachimbiro, en el ámbito de la Cordillera Occidental de los Andes, en el Cantón San Miguel de Urucuquí a unos 70 km al norte-noreste de Quito y 17 km al nor-oeste de Ibarra. Donde se encuentran tres centros poblados en las

¹⁵ Ver detalle del informe de los aspectos sociales en Miravalles referencia 29

¹⁶ Ver detalle del informe de los aspectos sociales en Miravalles referencia 37

inmediaciones del área de influencia, como más cercano está el centro poblado La Delicia de San Francisco con aproximadamente 600 habitantes.

Cabe indicar que dentro del censo realizado por el INEC se encontraron datos muy importantes para conocer más a fondo las características sociales, ocupaciones, niveles de estudio, y población económicamente activa, del área de influencia en estudio, ⁽¹⁷⁾

En el Cantón San Miguel de Urququí existe una población de 2796 en el área urbana y 11585 en el área rural con un porcentaje del 49.6% de mujeres y un 50.4% de hombres, representando el 4.2% de la población total en el provincia de Imbabura.

De la cual en un 69.4% únicamente presenta estudios primarios, se cuenta además con aproximadamente el 44% de población económicamente activa, de cuyo dato un 65% se dedican a la agricultura y ganadería.

Dentro de las actividades agrícolas se puede destacar son: maíz, frejol, arveja, papas, cebada, trigo, lentejas, habas, etc; dentro de las actividades ganaderas: la producción de leche y sus derivados.

Los diferentes grupos étnicos que se encuentran en la zona son representados por: mestizos, afro-americano e Indígenas, en donde se practica tanto el español como el quichua como su idioma.

Con las actividades del Proyecto, se piensa intensificar el desarrollo económico en la zona por la creación de empleos, los cuales puede variar dependiendo a cada una de las fases de desarrollo del proyecto, activando el sector terciario con actividades comerciales, servicios e infraestructura que pudieran demandar principalmente en la población de Chachimbiro, Azaya y San Francisco de Sachapamba.

3.7.2.2 Probables impactos sociales en el Proyecto Chachimbiro

- La Población.- En el área del Proyecto, las principales comunidades de influencia son Chachimbiro y Azaya y San Francisco de Sachapamba,

¹⁷ Censo realizado en por el Instituto Nacional de Estadísticas y Cencos (INEC) en noviembre del 2001, más detalles del mismo ver referencia 30

de origen rural, ubicadas en la Provincia de Imbabura, Cantón San Miguel de Urcuquí. La población total de la zona aumentará según la fase del Proyecto, siendo en la etapa de construcción la mayor demanda de trabajadores. De igual forma la demanda de servicios se incrementarán en la medida que se contraten trabajadores foráneos, pudiendo crearse desestabilización social si no se fomenta algún programa de desarrollo al que puedan acceder los trabajadores desempleados en las últimas fases de construcción del Proyecto.

- **Economía y condiciones sociales.-** El Proyecto podría presentar la disminución de alguna de las actividades agropecuarias de la zona, pero incrementaría sensiblemente el volumen de los servicios, crecimiento temporal de la población laboral acorde con las fases de desarrollo del Proyecto; aumento del nivel de empleo en la región, disminuyendo el índice de población económicamente inactiva; y acrecentamiento de las necesidades de servicios públicos. Por tal motivo es muy importante que se realice un plan de desarrollo que incentive a los pobladores a no dejar sus actividades agropecuarias y ganaderas, e incluso fomentado y capacitando a todos sus trabajadores en el cuidado del medio ambiente y como explotarlo de una manera más consciente y productiva. Esto se ha logrado con gran acogida en Centrales Geotérmicas con Miravalles III y Ahuachapan en Costa Rica y el Salvador respectivamente, logrando además desarrollar programas de desarrollo conjuntos con organizaciones gubernamentales y ONGs.
- **Servicios Públicos.-** Podrá darse una mayor demanda de servicios públicos existentes; no sólo por las necesidades del Proyecto, sino por la presencia eventual de mayor población, especialmente en Chachimbiro. Entre los servicios podrían ser: agua, electricidad, teléfono, salud, transporte, educación, recolección de basura, seguridad pública, correo.
- **Infraestructura vial.-** El mejoramiento y construcción de nuevas vías de comunicación permitirán que las poblaciones incrementen el comercio de la zona, y además permitirá una mayor afluencia de turistas y

visitantes, incrementando sensiblemente la actividad económica de la región.

3.8 PERSPECTIVAS AL FUTURO

- Es indiscutible que la actividad económica se desarrolle favorablemente en las zonas de influencia, por los varios motivos indicados anteriormente y que con un correcto manejo y administración estos pueden traer muchos beneficios tanto al desarrollo del proyecto como a sus posibles afectados.
- Es muy importante que la empresa que se encargue de la construcción de la Central, mantenga unas políticas de acercamiento a las comunidades próximas al Proyecto.
- Se podría trabajar conjuntamente entre el gobierno de la Provincia de Imbabura y la empresa constructora, para definir las necesidades sociales específicas de las poblaciones de Chachimbiro y La Delicia de San Francisco; entre las posibles ideas a estudiar son de gran importancia por ejemplo: la minimización y reciclado de residuos, programas de educación ambiental, de seguridad para los trabajadores y la información pública.
- Además, sería muy importante incentivar a toda la población de la zona afectada, en la importancia de seguir con sus actividades habituales, principalmente como es la agricultura, utilizando la geotérmica como por ejemplo para la calefacción de invernaderos y calentadores de agua.
- Es muy importante que se desarrolle además campañas para erradicar el índice de analfabetismo de la región, que actualmente se ubica en el 12%, e incentivar a la población en la importancia de la educación secundaria y universitaria que les permita incrementar su nivel de vida.

CAPITULO 4

FACTIBILIDAD OPERACIONAL

4.1 CARACTERÍSTICAS INICIALES DEL PROYECTO

El principal propósito de la exploración de una zona geotérmica es definir su tamaño, forma y estructura y determinar sus características, como son: el tipo de fluido, temperatura, composición química y su capacidad para producir energía.

De acuerdo a las investigaciones realizadas por Almeida E.(1995), y por el Ing. Eduardo Aguilera Ortiz (años siguientes), publicando varios de sus trabajos por medio de los cuales determinaron que la zona de Chachimbiro es apta para la generación eléctrica.

La idea de este proyecto es empezar con una central de generación eléctrica de 15 MW, con una proyección de 113 MW de potencia instalable y que la misma central provea de otro tipo de uso o ayuda a la población del lugar como es el secado de granos o el calor en invernaderos, etc.

4.1.1 DESCRIPCIÓN

Entre los años 2000 y 2002, la ESPE conjuntamente con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), desarrolló un proyecto de exploración geoquímica que confirmó e incrementó el interés del área de Chachimbiro, en vista que se descubrieron buenos indicios de que en profundidad existen temperaturas de por lo menos 260°C, mientras los geotermómetros químicos indican una temperatura de alrededor de 239°C .

En esta área todavía no se han completado los estudios de prefactibilidad geotérmica que incluyen investigaciones en la superficie del terreno (geología, hidrogeología y geoquímica), y de sub-superficie (geofísica y perforaciones

someras), para delimitar el área de máximo interés y determinar la ubicación de los pozos profundos que constituyen el elemento fundamental de los estudios de factibilidad geotérmica específicamente orientados a descubrir el yacimiento; determinar las características físicas y químicas del vapor natural que se utilizará en la central de generación eléctrica para evaluar la potencia eléctrica disponible.

Tabla 4.1 Potencial geotérmico de Chachimbiro

ÁREA GEOTÉRMICA	CHACHIMBIRO
Superficie Aprovechable (km ²)	3,20
Prof. Media del Reservorio (m)	1.750
Temperatura Media Anual (°C)	14
Temperatura Media Estimada, (° C)	239
Energía Primaria (KWh)	4,55 E+08
POTENCIA INSTALABLE (MW)	113

Fuente: Ver referencia [19] NOTA (1) Temperaturas estimadas a partir del Modelo Geotérmico.

El método volumétrico se basa en determinar la energía calórica contenida en un volumen de roca ubicado bajo el área de interés, entre la superficie del suelo y una profundidad de 3 km, esta profundidad se la toma con base en un criterio económico derivado de los actuales costos de perforación de los pozos geotérmicos.

Se remarca que la metodología utilizada permite solo una estimación aproximada sobre el potencial energético, y que la única forma de comprobarlo es mediante las perforaciones profundas y las pruebas de producción.

4.1.2 CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO

Para determinar las características del fluido de Chachimbiro se lo hizo en base a una investigación exploratoria, ya que el tema elegido ha sido poco explorado y reconocido en el Ecuador, también porque sobre él es difícil formular hipótesis

precisas o de ciertas generalidades. A parte es un nuevo fenómeno en el medio ecuatoriano, que precisamente por su novedad, no admite todavía una descripción sistemática, y por último los recursos que disponemos como investigadores son insuficientes como para emprender un trabajo más profundo. Las características más importantes son: la entalpia, temperatura, composición química, caudal y presión en la cabeza del pozo; no obstante el análisis se realizará en la situación más conservadora.

Ahora bien para el análisis termodinámico de una central geotérmica de 15 Mw, se necesita conocer datos como la temperatura, presión y caudal en boca de pozo, para lo cual se ha tomado los siguientes criterios, debido que no han realizado aun las perforaciones requeridas, obtenido de las tablas 4.1, 4.2 y 4.3:

Tabla 4.2 Características principales de los fluidos para un recurso con líquido dominante según algunos autores de libros referentes a la geotermia.

Tipo	Flash simple y doble
Presión boca de pozo (bar)	5-15
Presión de ingreso a la turbina (bar)	4-10
Presión a la salida de la turbina (bar)	0,044 a 0.199
Temperatura en el yacimiento (oC)	Sobre los 200
Entalpia (kJ/kg)	640-3000
Titulación (%)	0.1-0.5
Consumo (Kg/KWh)	8-460
Gases no condensables (%)	0-25; de los que 65-95%CO ₂ y 1-20% H ₂ S, y otros en menor proporción metano, nitrógeno, hidrogeno, acido bórico, amoniaco y gases raros.
Profundidad pozos (m)	1000-3000
Pozos productores	5-6 (30 MW)
Pozos inyectores	2-3 (30 MW)

Tabla 4.2 Características principales de los fluidos para un recurso con líquido dominante según algunos autores de libros referentes a la geotermia. (Continuación)

Producción (MW)	1-200MW
Consumo interno de la planta %	3-5 para centrales de vapor seco. 1-10 para centrales de flashing. 15-25 para centrales híbridas y binarias.
Otros	En segundo flash la presión de ingreso 1-1.5 bar
Eficiencias térmica totales %	En ciclo cerrado entre 10 a 30 En ciclo abierto entre 7 a 10
Eficiencia interna de turbina %	60-80
Eficiencia eléctrica %	85-95
Eficiencia Mecánica %	80-90
Factor de potencia promedio	0.80-0.90
Reinyección %	80-85
Tiempo de vida útil de un pozo	10 años
Tiempo de vida de un campo geotérmico	30 años
Diámetro de pozos (pulg)	6-22
Diámetro de tubería de pozo (pulg)	4-18
Base de información	Energía Geotérmica, Jaume Pous, España 2004, Energía Geotérmica H. Christopher- H. Armstead, 1989 Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact

Tabla 4.3 Características principales de los fluidos en las distintas centrales geotérmicas, las cuales son similares a las que se cree obtener en Chachimbiro.

País	Argentina	Chile	Colombia	Costa Rica	Nicaragua	Nicaragua	El Salvador	El salvador	México
Nombre	campo geotérmico Copahue-Caviahue, provincia del Neuquén	Campos como la Torta, Calabozo, Tatio ,zona de Puyehue-Cordón Caulle y Puchuldiza	UPME	Miravalles, Unidad I,II y III Guanacaste	Planta Geotérmica San Jacinto Tizate.	Momotombo	Campo Geotérmico de Ahuachapán	Campo Geotérmico de Berlín I,II y III	Los Azufres II, Michoacán
Tipo	contrapresión	Flash simple con condensador	Flash con condensador	Simple flash-condensador	Simple flash-condensador	Simple flash	Simple y doble-condensador	Simple y doble -condensador	Simple , doble y binaria -condensador
Presión al ingreso de la turbina (bar)	1-3	10	5 y 7	6	10	7	(1-2)4.6 (3) 5.6 1.5 bar-a en doble flashing	10-12	8
Presión a la salida de la turbina (bar)	>1 bar	<1 bar	0.10-0.12	I) 0.125 (II)0.10 (III)0.09	1	0.12	0.085	0.098	0.10
Temperatura en el yacimiento (oC)	200-250	150 -315	200-250	240	250	200	240	290	300
Temperatura de admisión (°C)	99.6-134	180	152-165	I) 159 (II)159 (III)157	180	165	(1-2)149 (3) 156	180	171
Entalpia (kJ/kg)	-----	1000-2000	1800-2600	2000	-----	-----	1000	1350	-----
Titulación (%)	3-50	10-50	10-20	14	-----	20	14-20	15	10-60
Caudal total(Kg/s)	-----	-----	190-230	I) 760 (II)726 (III)400	-----	77.7	(1-2)814 las dos (3)337	345	270
Caudal vapor (Kg/s)	-----	-----	28-35	I) 106.4 (II)101.6 (III)56	-----	16	1-2)114 las dos (3)48	52	81
Gases no condensables (%)	-----	0.2 a 10%, donde 98% CO2 y 2% H2S.	1%	2-2.5	-----	0.5	0.2	0.4	1.5-2.5
Profundid	800-1400	1.000 – 2.500	1600-2400	1 637-2000	724-2235	313-2983	800	2800	2800

ad pozos (m)	m								
Pozos productores	-----	-----	-----	(I)11 (II) 16	-----	8	-----	-----	-----
Pozos inyectoros	-----	-----	-----	(I) 5 (II)11	-----	4	-----	-----	-----
Producción (MW)	-----	300 MW (con módulos de 50 MW)		(I) 55 (II)58 (III)27.5	5	35	(1-2)79 (3)30	(I y II) 53 (III) 40	25
Otros	-----	Las de 2F 20-25% +s potencia que la 1F. En el 2000 fue promulgada en Chile la Ley de Geotermia.	2F las 2-2.5 bares y a aprox. 120 oC. 20 a un 25% de potencia adicional	(Pozos) Agujeros de 8 a 26 pulg. Tuberías de 9 a 20 pulg	Agua de refrigeración 41 oC	Se reinyecta el 83% del fluido.	5Mw por pozo se producen sistema de extracción de gases del tipo "eyector" Incremento en 20%. DF	8MW por pozo se producen	-----
Factor de potencia	-----	-----	90%	-----	80%	85%	(1-2)85% (3)87.5%	85%	90%
eficiencia	-----	eléctrica 90%, general 10%	Mecánica 80% eléctrica 85%	Neta 15%	Eléctrica 95% Neta 10%	Eléctrica 85% Neta 8%	Eléctrica 90% Neta 22-24%	Neta 22-24%	-----
Base de información	Revista de la Asociación Geológica Argentina, volumen 57(2): 182-194	Depto. Ingeniería Mecánica Universidad de Chile, Carlos Córdova Riquelme ccordova@ing.uchile.cl Luciano Achurra R. Geólogo, Mag. Cs. Proyecto Geotermia - Servicio Nacional de Geología y Minería Ministerio de Minería , Gobierno de Chile	Unidad de planeación minera energética, UPME, Documento ANC-0603-21-00 utilización de la energía geotérmica documento descriptivo, Bogotá, D.C., Marzo de 2003	El sistema termoeléctrico del ICE, documento en su pagina web.	Universidad Nacional De Ingeniería Facultad De Electrotecnia y computación (FEC) Ing. Julio Canales	MOMOTOMB O – LEON NICARAGUA 2008 Pag web Modelo de Presentación de Investigación Tema PLANTA GENERADORA MOMOTOMB O	Desarrollo de los Recursos Geotérmicos en El Salvador, Luz A. Barrios lbarrios@lageo.com .sv Ingeniería de Reservorios Gerencia Producción de Lageo	Desarrollo de los Recursos Geotérmicos en El Salvador, Luz A. Barrios lbarrios@lageo.com .sv Ingeniería de Reservorios Gerencia Producción de Lageo	A New 100-MW Geothermal Power Project Starts Operations Near Morelia, Michoacán in Central Mexico By Dr. Gerardo Hiriart – Comisión Federal de Electricidad, México City, México

-----: Datos nos disponibles

Tabla 4.4 Características del fluido de Chachimbiro (Posibles con criterio conservador)

Característica	valor	Referencia
Temperatura media en el reservorio	239 °C	Almeida E., (1995), y por el Ing. Eduardo Aguilera Ortiz. [10,19,20]
Tipo de sistema geotérmico	alta temperatura, alta entalpía y de tipo líquido dominante	Son los que más frecuentemente se encuentra en el planeta y en especial en Latino América, con ejemplos muy claro como en el Salvador, Costa Rica y México (todos en producción) y en estudios en países como: Chile, Argentina y Colombia; todos ellos poseen similares características de formación rocosa por estar ubicados en la misma línea magmática de Ecuador. [1-37 y]
Gases no condensables	< 3% en peso de los que: 80%CO ₂ 10% H ₂ S.	El rango entre 2 a 10% de dichos gases, y en la mayoría de los casos en producción mencionados anteriormente este porcentaje no supera el 3% en peso. [1-4,7, 21-27 y Tablas 4.2 y 4.3
Grado de titulación (vapor/agua)	0.20-0.25	Este tiene un rango basado en la experimentación de pozos ya en producción que es de 0.1 a 0.5. [1-4,7, 21-27 y Tablas 4.2 y 4.3].
Presión en boca de pozo	6-12 bar	Rango de las tablas 4.2 y 4.3
Presión al ingreso de la turbina primera etapa	5-10 bar	Rango de las tablas 4.2 y 4.3

Tabla 4.4 Características del fluido de Chachimbiro (Posibles con criterio conservador) (Continuación)

Presión a la salida de la turbina primera etapa	> 1 bar	Promedio de las tablas 4.2 y 4.3
Caída de presión	25%	Desde la boca del pozo a la turbina en su primera etapa, referencia tabla 4.2 Hay gases en menor proporción metano, nitrógeno, hidrogeno, ácido bórico, amoníaco y gases raros.
Caudal (mezcla desde 20-25%)	De 135 - 180 kg/s	El consumo de fluido varía entre dependiendo del rendimiento de la central, el tipo y sus características. Se sacó de un promedio de las centrales y lo expuesto en libros para 15 MW [1-4 y Tablas 4.2 y 4.3]
Caudal (esto es solo vapor)	De 27 - 45 kg/s	El consumo de fluido varía entre dependiendo del rendimiento de la central, el tipo y sus características. [1-4 y Tablas 4.2 y 4.3]
Diámetro de pozos	De 6 a 22 pulgadas	Varían dependiendo del caudal, el cual [1-4,7, 21-27 y Tablas 4.2]
Diámetro de tubería de pozo	De 4 a 18 pulgadas	Varían dependiendo del caudal, el cual [1-4,7, 21-27 y Tablas 4.2]
Presión al ingreso de la turbina segunda etapa (si se tiene)	> 1 bar	Promedio de las tablas 4.2 y 4.3
Presión a la salida de la turbina segunda etapa	0,044 a 0.199 bar.	Esto corresponde al rango de temperaturas promedio del vapor de saturación está entre 30 a 60 °C, [1-4,7, 21-27 y Tablas 4.2 y 4.3]

Tabla 4.4 Características del fluido de Chachimbiro (Posibles con criterio conservador) (Continuación)

Profundidad de pozo	1750 m	Promedio (Tabla 4.1)
Pozos productores	2-3	Tomado del promedio y considerando que un ejemplo real para una central de 30 MW el rango es el doble. [1-4,7, 21-27 y Tablas 4.2 y 4.3]
Pozos reinyección (si se considera)	1-2	Tomado del promedio y considerando que un ejemplo real para una central de 30 MW el rango es el doble. [1-4,7, 21-27 y Tablas 4.2 y 4.3]
Porcentaje de reinyección (si se considera)	80%	Tablas 4.2
Eficiencia térmica ciclo cerrado	<20%	Promedio de tablas 4.2 y 4.3
Eficiencia térmica ciclo abierto	<10%	Promedio de tablas 4.2 y 4.3
Vida útil del campo geotérmico	30 a 50 años	En condiciones recomendables de producción. [1-4,7, 21-27 y Tablas 4.2 y 4.3]
Vida económicamente útil de un pozo productor	10 años	En condiciones recomendables de producción. [1-4,7, 21-27 y Tablas 4.2 y 4.3]

- Esto está fundamentado en la experimentación de pozos en producción alrededor del mundo y puestos en consideración por varios autores, universidades, científicos especializados en el tema y centrales en producción alrededor del mundo dentro de este rango.
- Para temperaturas optimas de flasheo en algunos autores se sigue el ejemplo matemático utilizado en la central de Wairakei, donde encuentra

una fracción de agua que se evapora y una temperatura optima en cada etapa, tomando como referencia la temperatura de ingreso y de salida del proceso. Como ejemplo tenemos que para centrales de simple flash a temperaturas de entrada entre 200°C y con salidas de 52°C, la temperatura optima será 150.7°C y si es de doble flasheo la temperatura optima será 101.3°C con una fracción de vapor en la primera etapa correspondiente al 10%. [7 y Tablas 4.2 y 4.3]

- La salida del fluido geotérmico de la turbina se realiza de dos maneras: una a presión atmosférica (contrapresión) y la otra con un condensador, que según los estudios realizados y mediante las pruebas de producción en las diferentes centrales ya nombradas, es la forma más eficiente de generar un gran salto entálpico en la turbina para generar trabajo mecánico con una menor cantidad de vapor.
- La reinyección del fluido geotérmico al suelo hace que la vida del pozo se alargue y que la capacidad de reconstitución del mismo sea elevada asegurando así la inversión.
- La eficiencia de una central geotérmica donde se llega a rendimientos mayores en centrales de vapor seco con última tecnología o también en proyectos mixtos o de doble uso, con porcentajes de hasta 30%, pero a una alta inversión.
- Después que un pozo llega a su una vida económicamente finita, su producción se empieza a ver insuficiente para justificar el mantenimiento continuo del capital invertido y el equipamiento continuo del mismo. Cuando se ha alcanzado esta vida, resulta económico profundizar el pozo o simplemente desecharlo y empezar a perforar un nuevo pozo en otra parte.

4.1.3 USOS Y PROPÓSITOS DE LA CENTRAL DE 15 MW

- El principal propósito es la de generación eléctrica.
- Como base inicial en la recaudación de información y estudios necesarios, que servirán para en un futuro aumentar la capacidad instala hasta 113 MW.

- Como uso doble, el calor del fluido desalojado del proceso se pretende usarlo en secado y calefacción para la población y cultivos aledaños.
- Dar una fuente de trabajo a las personas de sus alrededores en tareas administrativas, operacionales, de construcción y mantenimiento.
- Incrementar la capacidad de generación eléctrica del país por medio de energías renovables, disminuyendo así el consumo de combustibles fósiles y la importación de energía de nuestros países vecinos; en consecuencia un abaratamiento en el costo de producción de 1 KW/h.

4.2 ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS POSIBLES PARA LA CENTRAL DE CHACHIMBIRO

Tabla 4.5 Selección de Sistema

Ventaja	Vapor seco	flashing	Binaria
Mayor temperatura del fluido de trabajo.	5	3	2
Menor cantidad de elementos auxiliares.	5	2	1
Mayor aprovechamiento de la energía del fluido.	3	3	2
Menor número de obras civiles, tuberías, instrumentos, etc.	4	2	1
Reducción de la inversión económica.	4	3	1
Las más utilizadas.	1	5	3
La tecnología está más desarrollada y modelos a seguir.	2	4	3
Son versátiles pueden sacarle mayor provecho a la mezcla de vapor-agua.	0	4	2
Consumen menos caudal másico, siempre y cuando estén a la misma temperatura y presión.	2	2	3
No están limitadas por las condiciones de presión y entalpia altas para generar energía eléctrica.	1	3	4

Tabla 4.5 Selección de Sistema (Continuación)

Poca limpieza o separación de las sales, minerales y demás gases antes de ingresar a la turbina.	1	1	3
Total positivo	28	32	25
Desventaja			
Los aislamientos térmicos deben ser más gruesos y de mejor calidad de materiales.	4	3	3
Sistema muy peligroso.	4	3	2
Gran cantidad de arrastre de pequeñas partículas de rocas, arena..	4	3	2
Grandes cantidades de emanaciones de gases.	3	3	1
El consumo unitario de vapor es elevado.	4	3	1
Los costos de operación, mantenimiento y producción son más elevados.	1	2	4
Fluido de trabajo especial u sistemas auxiliares como combustibles.	2	2	5
Gran cantidad de intercambiadores de calor, y bombas, (sistema más complejo).	1	2	4
Total negativo	22	21	22
Total de toma de decisión	+6	+11	+3

NOTA: Los valores entre 1 y 5 corresponden al grado de afirmación o de cumplimiento de las ventajas y desventajas que se han nombrado en la primera columna del cuadro, así 1 cuando casi no se cumple lo enunciado y 5 como lo más alto para el grado de afirmación y certeza a lo enunciado. Todas las ventajas y desventajas se basaron en las tablas 4.1., 4.2 y 4.3

Según este cuadro de decisión el sistema a ser evaluado será el de flashing, lo que queda por comparar es si mejor un sistema de simple o doble flashing, para lo cual en base a un ejemplo se utilizará un análisis energético sin pérdidas y con características de entrada y salida del sistema iguales. Para ver los cálculos realizados, dirigirse al Anexo 1.

Como indica el cuadro comparativo de ciclos, el binario es el menos indicado para usar en estas circunstancias y básicamente debido a que se espera obtener un fluido de alta entalpía según los estudios por lo cual el uso de un fluido extra encarecería notablemente y no sería muy eficiente en comparación a los otros dos ciclos.

El ciclo de vapor seco no es tampoco recomendable usarlo debido a que este es uno de los ciclos menos usados en la generación de electricidad en base de la geotermia porque los yacimientos para este son una lotería, escasos y en muy raros casos se los encuentra, en el mundo hoy existen no más de cinco lugares con estas características de fluido y además dichos lugares presentan una formación geológica muy diferente a la que se tiene en la zona estudiada de Chachimbiro.

El sistema híbrido es descartado de inicio debido a que este es un sistema que reúne o mezcla las características de los tres anteriores mencionados y se lo usa cuando se quiere aumentar la capacidad instalada o mejorar la eficiencia de un sistema ya establecido, por lo cual no entra en este estudio preliminar.

4.3 SELECCIÓN DE UN SISTEMA

Al comparar los datos obtenidos en cada uno de los dos procesos seleccionados, podemos encontrar que el sistema de doble flash produce mayor cantidad de kWh/Ton, un menor caudal kg/s y una mayor eficiencia que el simple flash; vale recalcar que esto se da a las mismas condiciones para los dos sistemas, sin

pérdidas de ningún tipo y de forma básica. (Para mayor detalle de los cálculos realizados y de las características usadas para los mismos ver anexo 1)

Tabla 4.6 Comparaciones entre los dos sistemas

Comparación	Doble Flash	Simple Flash	Resultado comparativo
Potencial generada (kw)	145	97	+48 kw, aproximadamente 33% más producción de electricidad con el mismo caudal.
Consumo específico (kg/h kw)	6.21	8.45	-2.24, aproximadamente 26% menos en consumo de vapor con el mismo caudal.
Eficiencia térmica (si fuese ciclo cerrado)	18%	19.5%	Esto significa que casi con la misma eficiencia, la de doble flash consume menos cantidad de vapor y produce más energía (se alarga la vida del pozo).
Eficiencia térmica (como ciclo abierto)	7.5%	6.1%	+1.4% más eficiente, esto es de la figura 10.5 de H Christopher

Nota: (Para mayor detalle de los cálculos realizados y de las características usadas para los mismos ver anexo 1)

Como se indica en la tabla anterior, en las centrales de doble flash, la producción de electricidad es aproximadamente 26% mayor que en centrales de simple flash, con la misma cantidad de fluido de trabajo y en las mismas condiciones para ambos sistemas.

Tabla 4.6 Principales elementos que conforman una Central Geotérmica con un proceso de doble flash

Cantidad	Especificación
2-3	Pozos productores (PP)
1-2	Pozos re inyectores (PI)
1	Válvula principal en la cabeza de pozo (VP)
1	Válvula principal en la salida de los gases a la atmosfera(VP1)
1	Silenciador para los gases de escape. (S)
2	Equipo o cámara de flasheo primera y segunda etapa (CF1 y CF2)
1	Válvula de humedad (VPH)
1	Separador de humedad (purga) (SH)
2	Válvulas de control al ingreso de la turbina. (VSC)
1	Válvula de retención antes del segundo flash (VR)
1	Sistema para mantener la presión del condensador (E)
1	Condensador, esto es por ser más eficiente. (CP)
1	Sistema de condensación auxiliar o un intercambiador de calor si el fluido se lo va usar con otros propósitos.
1	Sistema turbina-generador para 15 Mw (TV-GE)
1	Torre de enfriamiento (TR)
2	Bombas para hacer circular el fluido desde la torre de enfriamiento hacia en condensador y viceversa. (BC, BT)
	tanques de almacenamiento
	Tubería salmuera
	Agua refrigeración
1	Sistema de seguridad contra incendios y explosiones.
	Sistema de tuberías con aislantes térmicos.
	Sistemas auxiliares para mantenimiento, medio ambiente.

CAPÍTULO 5

FACTIBILIDA TÉCNICA.

5.1. PUNTOS GENERALES DEL DISEÑO DE TURBINAS GEOTÉRMICAS.

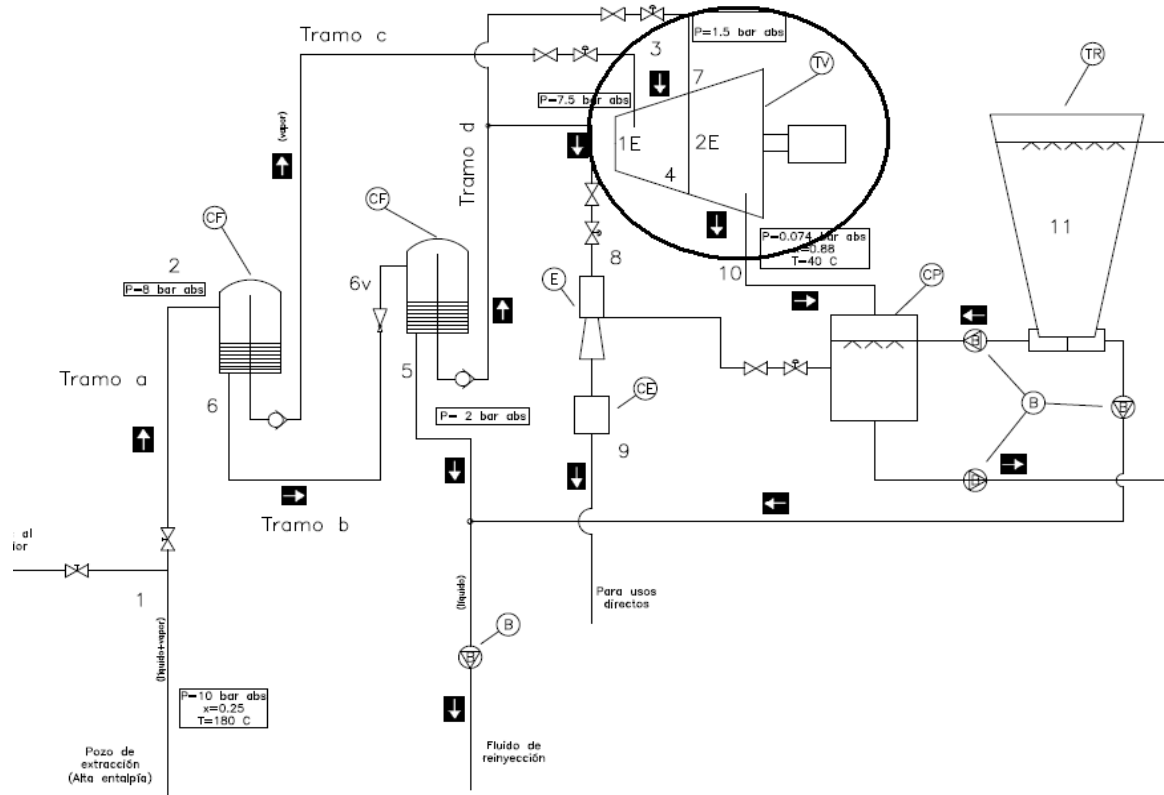


Figura 5.1 Ubicación de la turbina dentro del esquema final. (Mayor detalle ver anexo 3).

Calculo de potencia.- Para evaluar la potencia de una turbina de vapor requerimos de los siguientes datos:

- Presión de entrada del vapor. (MPa)
- Temperatura de entrada del vapor. (K)
- Presión de salida del vapor. (MPa)
- Eficiencia interna de la turbina.

- Eficiencia mecánica de la turbina
- Flujo del vapor. (t/h)

Con estos datos y con el auxilio del diagrama de Molliere o de las tablas de vapor, se obtiene, aplicando el modelo de volumen de control, la energía que produce la máquina teniéndose la siguiente información:

- Potencia en la flecha. (W)
- Temperatura de salida del vapor. (K)
- Entalpía de entrada del vapor. (KJ/kg)
- Entalpía de salida del vapor. (KJ/kg)
- Temperatura de sobrecalentamiento del vapor a la entrada. (K)
- Temperatura de sobrecalentamiento a la salida, cuando exista. (K)
- Calidad del vapor, cuando exista.
- Consumo específico de vapor. (Kg/KW)

Con estos valores queda establecida la capacidad de generación eléctrica y las características del vapor del proceso.

Otras consideraciones de diseño:

La velocidad permitida.- Esta es la velocidad que se tienen en las puntas de los álabes en la sección de baja presión, que por razones metalúrgicas debe ser limitada. Ver con más detalle en la sección 5.8

Gasto de vapor.- Las pérdidas a la salida deben estar dentro de los límites razonables, en otras palabras es fijar un límite al área de escape anular si no es excesiva la longitud de los álabes.

El tamaño.- Las primeras centrales geotérmicas llegaban a tener turbinas de máximo 30 MW, pero en la actualidad se tienen sistemas turbina-generadores de más de 135 MW.

La velocidad de rotación.- es sabido que si se puede obtener una gran velocidad en el rotor se obtendrá mayor cantidad de energía debido a que el generador es dependiente de las revoluciones de la turbina.

Un ejemplo de estas condiciones es Wairakei, donde a su inicio en 1971 se tenía una unidad con un ingreso de flujo a 4.4 y 1.5 ata, con doble descarga a 38 mm Hg contrapresión a 1500 rpm; luego en los Geiseros se pusieron unidades de 55W a 7.7 ata/ 179 grados, 102 mm Hg contrapresión, descarga doble y 3600 rpm; en los últimos años se han desarrollado unidades superiores a los 100MW y con cuádruple descarga.

Eficiencia.- Para que la energía del vapor se utilice eficientemente en ambos tipos de turbina (acción y reacción), es necesario utilizar varios escalones en cada uno de los cuales se convierte en energía cinética una parte de la energía térmica del vapor. Si se hiciera toda la conversión de los dos tipos de energía en un solo escalón, la velocidad rotatoria de la rueda sería excesiva. Por lo general, se utilizan más escalones en las turbinas de reacción que en las turbinas de acción. Se puede comprobar que, con el mismo diámetro y la misma cantidad de energía, la turbina de reacción necesita el doble de escalones para obtener un rendimiento máximo. Las turbinas más grandes, que normalmente son de acción, emplean hasta cierto grado la reacción al principio del recorrido del vapor para que el flujo de vapor sea eficaz. Muchas de las turbinas de reacción utilizan primero un escalón de control de acción, lo que reduce el número de escalones necesarios.

La eficiencia de expansión de las turbinas modernas de varios escalones es alta, dado el avanzado estado de desarrollo de los componentes utilizados en las turbinas y la posibilidad de recuperar las pérdidas de un escalón en los siguientes, con un sistema de recalentamiento. El rendimiento que se obtiene al transformar en movimiento la energía teóricamente disponible suele superar el 90%.

5.1.2 BALANCE ENERGÉTICO

El balance energético de la turbina utilizada en el esquema final se lo puede ver en el anexo 2. En esta sección se muestra las formulas y los cálculos de las cajas negras para la selección de un tipo de turbina. Para el uso de la generación geotérmica hay cuatro tipos de turbinas de vapor según su etapa de ingreso y salida del vapor, para lo cual se realizó un análisis de cajas negras utilizando las mismas características en la entrada y salida en cada una de ellas. (Características ver Tabla 4.4)

a) Turbina de contrapresión.- En este tipo de turbinas el vapor de descarga se realiza a una presión superior a la atmosférica; normalmente se las utiliza en campos de extracción con una calidad de vapor seco y donde se vaya a utilizar el vapor de escape para usos indirectos.

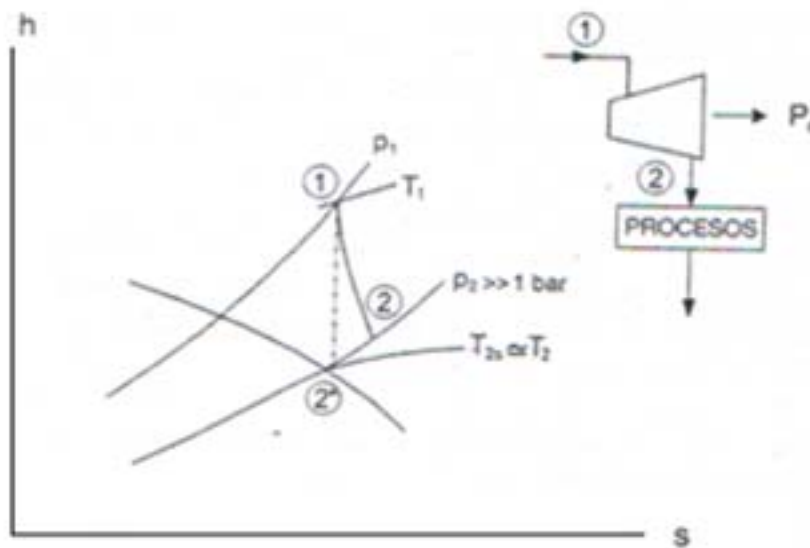


Figura 5.2 Representación del proceso de expansión del vapor en una turbina de contrapresión sobre un diagrama entalpia-entropía. [2]

Como ejemplo numérico para la realización de las cajas negras tenemos una turbina con contrapresión a una presión de ingreso de 7 bar. A temperatura de saturación y a una salida de la misma a 1.5 bar. Y temperatura de saturación. Un

caudal de 1 kg/s, más eficiencias interna de 70%, mecánica 85% y eléctrica 90% (Características ver Tabla 4.4) tendremos la siguiente potencia eléctrica:

$$P_e = wQ(\eta_m \eta_e) \quad (18)$$

Donde:

$w = w^* \eta_i$, w^* es el trabajo isoentrópico.

$$w = (h_1 - h_{2*}) \eta_i$$

Donde

h_1 corresponde a la entalpía específica para 7 bar que es: 2763.5 kJ/kg

h_{2*} corresponde a la entalpía isoentrópico específica para obtenida mediante:

$$h_{2*} = h_{3l}(1 - x^*) + h_{3v}x^*$$

h_{3l} corresponde a la entalpía específica para 60°C de líquido saturado

h_{3v} corresponde a la entalpía específica para 60°C de vapor saturado

Por considerarla isoentrópico a la turbina tenemos:

$$s_{2*} = s_1 = 6.7080 \frac{kJ}{kg K}$$

$$s_{2*} = s_{3l}(1 - x^*) + s_{3v}x^*$$

s_{3l} corresponde a la entropía específica para 1.5 bar de líquido saturado

s_{3v} corresponde a la entropía específica para 1.5 bar de vapor saturado

¹⁸Todas las formulas comprendidas en el ejemplo son obtenidas del mismo libro pertenecientes a una turbina de contrapresión de vapor, detalle en referencia [2]

Título de la mezcla:

$$6.7080 = 1.4336(1 - x^*) + 7.2233x^*$$

$$x^* = 0.911$$

$$h_{2^*} = 467.11(1 - 0.911) + 2693.6(0.911)$$

$$h_{2^*} = 2496.24 \text{ kJ/kg}$$

El trabajo obtenido por la turbina:

$$w = (2763.5 - 2496.24)0.70$$

$$w = 187.1 \text{ kJ/kg}$$

La potencia generada:

$$P_e = 187.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 1 \text{ kg/s} (0.85 * 0.90)$$

$$P_e = 143.12 \text{ KW}$$

b) Turbina de condensación.- Estas son las turbinas más usadas en las centrales geotérmicas debido a que son más eficientes, ya que el vapor de descarga se lo hace en un condensador donde se fija la temperatura a presiones menores que la atmosférica. En dichas turbina la temperatura del condensador se fija entre los 40 a 60 °C, obligando a mantener al condensador a una presión entre 0.2 y 0.07 bar absolutos.

Estas turbinas son exclusivas para el uso de generación ya que por la baja temperatura a la que sale el agua del condensador dificulta su uso para otro proceso indirecto. El costo de estas turbinas es un poco mayor que las de contrapresión, pero se lo contrarresta con la mayor cantidad de potencia que se obtiene del uno con relación al otro.

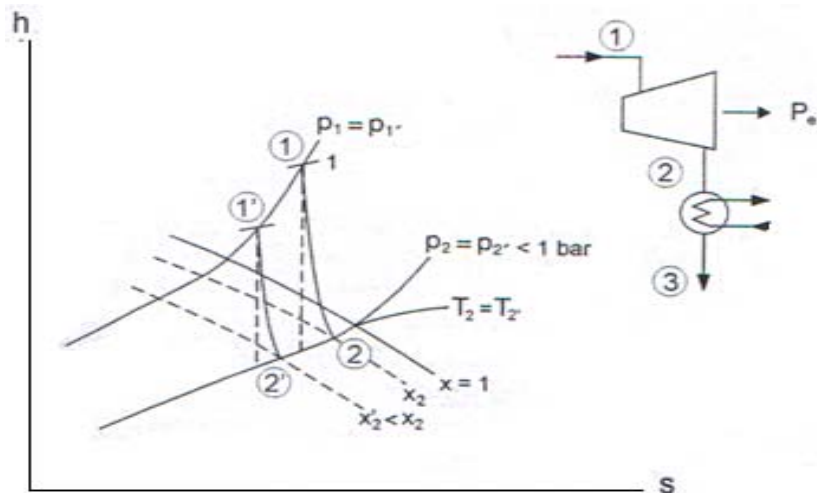


Figura 5.3 Representación del proceso de expansión del vapor en una turbina de condensación sobre un diagrama entalpía-entropía. [2]

Utilizaremos los mismos datos del ejemplo anterior pero la diferencia radica en la condición de salida del vapor que estará a 60°C.

$$P_e = wQ(\eta_m \eta_e) \quad (19)$$

Donde:

$w = w^* \eta_i$, w^* es el trabajo isoentrópico.

$$w = (h_1 - h_{2*}) \eta_i$$

Donde

h_1 corresponde a la entalpía específica para 7 bar que es: 2763.5 kJ/kg

h_{2*} corresponde a la entalpía isoentrópico específica para obtenida mediante:

$$h_{2*} = h_{3l}(1 - x^*) + h_{3v}x^*$$

h_{3l} corresponde a la entalpía específica para 60°C de líquido saturado

h_{3v} corresponde a la entalpía específica para 60°C de vapor saturado

¹⁹ Todas las formulas comprendidas en el ejemplo son obtenidas del mismo libro pertenecientes a una turbina con condensación de vapor, detalle en referencia [2]

Por considerarla isoentrópico a la turbina tenemos:

$$s_{2*} = s_1 = 6.7080 \frac{kJ}{kg K}$$

$$s_{2*} = s_{3l}(1 - x^*) + s_{3v}x^*$$

s_{3l} corresponde a la entropía específica para 60°C de líquido saturado

s_{3v} corresponde a la entropía específica para 60°C de vapor saturado

Título de la mezcla:

$$6.7080 = 0.8312(1 - x^*) + 7.9096x^*$$

$$x^* = 0.83$$

$$h_{2*} = 251.13(1 - 0.83) + 2609.6(0.83)$$

$$h_{2*} = 2208.66 \text{ kJ/kg}$$

El trabajo obtenido por la turbina:

$$w = (2763.5 - 2208.66)0.70$$

$$w = 388.4 \text{ kJ/kg}$$

La potencia generada:

$$P_e = 388.4 \frac{kJ}{kg} * 1kg/s(0.85 * 0.90)$$

$P_e = 297.12 \text{ KW}$ 51% más energía generada que una turbina de contrapresión de iguales características.

A hora bien si logramos que cada vez sea menor la temperatura a que trabaja el condensador obtendremos mayor energía generada así tenemos que si el condensador trabaja a 40 °C:

$$6.7080 = 0.5725(1 - x^*) + 8.2570x^*$$

$$x^* = 0.80$$

$$h_{2*} = 167.57(1 - 0.80) + 2574.3(0.80)$$

$$h_{2*} = 2092.95 \text{ kJ/kg}$$

El trabajo obtenido por la turbina:

$$w = (2763.5 - 2092.95)0.70$$

$$w = 469.38 \text{ kJ/kg}$$

La potencia generada:

$$P_e = 469.38 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 1\text{kg/s}(0.85 * 0.90)$$

$$P_e = 359.1 \text{ KW}$$

20% más de potencia que con una turbina de condensación de iguales características pero, descarga a 40°C.

c) Turbina de condensación con extracción intermedia.- Este tipo de sistema es una mezcla de los dos casos anteriores, ya que utiliza un condensador para obligar al vapor dar un salto entálpico grande en la utilización de la generación de energía y a su vez por medio de la extracción intermedia facilita el uso del fluido (alta entalpía) en usos indirectos. Se las puede hallar como conjunto de turbinas en serie, una de contrapresión y una de condensación o bien una sola de dos etapas.

La ventaja más sobresaliente de estas turbinas es la adaptabilidad que poseen a la variación de la demanda ya sea de calor o de electricidad, mediante la modulación de la tasa de extracción intermedia.

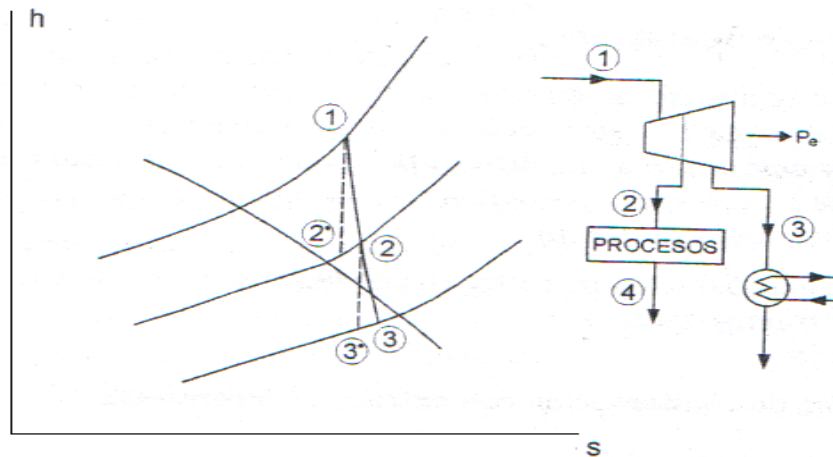


Figura 5.4 Representación del proceso de expansión del vapor en una turbina de condensación con extracción intermedia sobre un diagrama entalpía-entropía. [2]

Usaremos el mismo ejemplo de la turbina de condensación para poder compararlas:

Trabajo en la primera etapa a contrapresión 7 bar: $(^{20})$

$w_1 = w_1^* \eta_{i1}$, w_1^* es el trabajo isoentrópico.

$$w_1 = (h_1 - h_{2*}) \eta_{i1}$$

Donde

h_1 corresponde a la entalpía específica para 7 bar que es: 2763.5 kJ/kg

h_{2*} corresponde a la entalpía isoentrópico específica para obtenida mediante:

$$h_{2*} = h_{3l}(1 - x^*) + h_{3v}x^*$$

h_{3l} corresponde a la entalpía específica para 1.5 bar de líquido saturado

h_{3v} corresponde a la entalpía específica para 1.5 bar de vapor saturado

Por considerarla isoentrópico a la turbina tenemos:

$$s_{2*} = s_1 = 6.7080 \frac{kJ}{kg K}$$

$$s_{2*} = s_{3l}(1 - x^*) + s_{3v}x^*$$

²⁰ Todas las formulas comprendidas en el ejemplo son obtenidas del mismo libro pertenecientes a una turbina con condensación con extracción intermedia de vapor, detalle en referencia [2]

s_{3l} corresponde a la entropía específica para 1.5 bar de líquido saturado

s_{3v} corresponde a la entropía específica para 1.5 bar de vapor saturado

Título de la mezcla:

$$6.7080 = 1.4336(1 - x^*) + 7.2233x^*$$

$$x^* = 0.911$$

$$h_{2*} = 467.11(1 - 0.911) + 2693.6(0.911)$$

$$h_{2*} = 2496.24 \text{ kJ/kg}$$

El trabajo obtenido por la turbina:

$$w_1 = (2763.5 - 2496.24)0.70$$

$$w_1 = 187.1 \text{ kJ/kg}$$

Trabajo en la segunda etapa con condensación 1.5 bar de entrada y 40 grados de salida:

$w_2 = w_2^* \eta_{i2}$, w_2^* es el trabajo isoentrópico.

$$w_2 = (h_2 - h_{3*}) \eta_{i2}$$

$$h_2 = h_1 - \eta_{i1}(h_1 - h_{2*})$$

$h_2 = h_{3v}$ sin la eficiencia isoentrópico.

Por considerarla isoentrópico a la turbina tenemos:

$$s_{3*} = s_2 = 7.2233 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$s_{3*} = s_{4l}(1 - x^*) + s_{4v}x^*$$

s_{3l} corresponde a la entropía específica para 40°C de líquido saturado

s_{3v} corresponde a la entropía específica para 40°C de vapor saturado

Título de la mezcla:

$$7.2233 = 0.5725(1 - x^*) + 8.2570x^*$$

$$x^* = 0.87$$

$$h_{3*} = h_{4l}(1 - x^*) + h_{4v}x^*$$

h_{4l} corresponde a la entalpía específica para 40°C de líquido saturado

h_{4v} corresponde a la entalpía específica para 40°C de vapor saturado

$$h_{3*} = 167.57(1 - 0.87) + 2574.3(0.87)$$

$$h_{3*} = 2261.43 \text{ kJ/kg}$$

El trabajo obtenido por la turbina:

$$w_2 = (2693.6 - 2261.43)0.70$$

$$w_2 = 302.52 \text{ kJ/kg}$$

La potencia está dada por:

$$P_e = [w_1 + (1 - y)w_2]Q(\eta_m \eta_e)$$

Donde:

Q es el caudal de vapor de ingreso a la turbina.

y, es la tasa de extracción del vapor y es igual a:

$$y = \frac{Q_{ext}}{Q}$$

El calor que se aporta para los usos indirectos esta dado por:

$$P_t = yQ(h_2 - h_4)$$

El rango o margen de variación para la generación de energía para este mismo ejemplo numérico esta dado por:

$$\text{Cuando } y = 0 \quad P_{e \max} = [w_1 + w_2]Q(\eta_m \eta_e)$$

$$P_{e \max} = [187.1 + 302.52] \frac{kJ}{kg} * 1 \frac{kg}{s} * (0.85 * .90)$$

$$P_{e \max} = 374.559 \text{ KW}$$

5% más de potencia que con la turbina de condensación del anterior caso a 40°C.

Cuando $y = 1$

$$P_{e \min} = w_1 Q (\eta_m \eta_e)$$

$$P_{e \min} = 187.1 \frac{kJ}{kg} * 1 \frac{kg}{s} * (0.85 * .90)$$

$$P_{e \min} = 143.13 \text{ KW}$$

d) Turbina con recalentamiento intermedio.- Este tipo de turbinas no entra en el estudio a pesar de aumentar notablemente el trabajo generado por unidad de masa de vapor turbinado; debido a que el recalentamiento se debe hacer a base de combustibles fósiles, con lo cual se dejaría de lado la principal idea del proyecto de energía limpia.

Tabla 5.1 Comparación de resultados entre los sistemas de turbinas estudiados mediante balance energético (Cajas Negras).

Tipo	Condiciones (Obtención de las mismas ver tabla 4.4)	Potencia nominal
Turbina de contrapresión	Entrada: 7 bar Salida: 1.5 bar Caudal: 1 kg/s Eficiencia interna 70%, Eficiencia mecánica 85% Eficiencia eléctrica 90%	P_e = 143.12 KW
Turbina de condensación	Entrada: 7 bar Salida: 60 y 40 °C Caudal: 1 kg/s Eficiencia interna 70%,	60oC, P_e = 297.12 KW 40oC, P_e = 359.1 KW

Tabla 5.1 Comparación de resultados entre los sistemas de turbinas estudiados mediante balance energético (Cajas Negras). (Continuación)

Turbina de condensación con extracción intermedia	Entrada: 7 bar Salida etapa 1: 1.5 bar Salida etapa 2: 40 °C Caudal: 1 kg/s Eficiencia interna 70%, Eficiencia mecánica 85% Eficiencia eléctrica 90% y, rango del margen de variación de la extracción.	$P_{e\ max}$ = 374.56 KW $P_{e\ min}$ = 143.13 KW
Turbina con recalentamiento intermedio	No está en estudio de este proyecto.	

Nota: Las condiciones de entrada son las mismas para cada uno de los casos ver el ejemplo en la sección 5.12.a-c

Con una turbina de condensación se obtiene un 51% más de energía generada que una turbina de contrapresión de iguales características del fluido.

Con una turbina de condensación a menor temperatura de descarga se obtiene en promedio 15 % más de potencia que con una turbina de condensación de iguales características pero, una descarga a 60°C.

Con una turbina de condensación con extracción intermedia a la potencia máxima se obtiene un 5% más de potencia que con la turbina de condensación del anterior caso a 40°C de descarga.

Queda demostrado que mediante este análisis de los balance energéticos generales de cada turbina, de todas ellas la que mejores resultados teóricos a demostrado es la turbina de condensación con extracción intermedia.

5.1.3. SELECCIÓN Y MATERIALES

En la actualidad existen algunas empresas que se dedican a la fabricación de turbinas de vapor para la generación de energía geotérmica, entre las cuales tenemos: Toshiba, Siemens, Ansaldo Energía, General Electric, Ormat, Hitachi, Siemens, Mitsubishi, Hangzhou, Alstom Power, Avin Technologies PVT, Dresser-Rand, entre otras; las mismas que con el pasar de los años, experiencia, y debido a los avances tecnológicos, han desarrollado mejoras considerables en el diseño y construcción de cada uno de los elementos que conforman las turbinas.

Al mismo tiempo, la demanda de pequeñas plantas de energía geotérmica también se ha ampliado. Las pequeñas plantas de energía geotérmica se utilizan generalmente para los siguientes fines:

- Como una unidad experimental de una planta piloto para la instalación de un tamaño mayor.
- Satisfacer las necesidades de la demanda de electricidad en la zona limitada.
- Como fuente de energía durante la construcción de la planta.
- Auxiliar de emergencia o principal fuente de energía geotérmica para la generación de la planta.
- Simplificación de líneas de transmisión de vapor así como una unidad de la cabeza, pozos geotérmicos porque están dispersos en campo geotérmico.

A continuación se indicaran más en detalle, los fabricantes de turbinas de vapor más importantes, y los diferentes productos que ofrecen, teniendo así:

Tabla 5.2 resumen de características, ventajas y otros de fabricantes de turbinas geotérmicas.

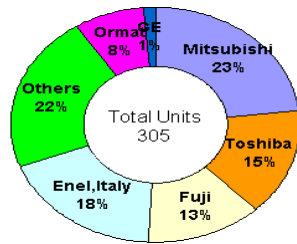
Marca	Siemens	Ansaldo Energía	Toshiba	General Electric	Mitsubishi	Ormat International	Fuji Electric
Características	<p>10 Mw para unidad de vapor compactas, de 10 a 250 Mw para turbinas de vapor industriales, y de 250 a 1200 Mw para grandes turbinas de vapor.</p> <p>Factor de potencia 85%</p>	<p>3 x 55 Mw 3000 o 3600 rpm</p> <p>182 oC</p> <p>6.5 bar, tipo GT-80, GT-60 o GT-40</p> <p>Salida de vapor a 20, 23, 26, 31"</p> <p>Modulares y fijas.</p> <p>Factor de potencia 80%</p>	<p>500 kw a 9000 kw, de 1 a 6 etapas,</p> <p>Entre 1500 a 7400 rpm.</p> <p>Modulares y fijas.</p> <p>Con condensador o a contra presión.</p> <p>Factor de potencia 80%</p>	<p>de 5 a 100 Mw, presión de hasta 30 bar</p> <p>temperatura máxima de 300 oC</p> <p>Con condensador, a 26" y 23"</p> <p>Factor de potencia 90%</p>	<p>Tipo de inducción con condensación, contrapresión, y de extracción.</p> <p>0.1 MW a más de 150MW.</p> <p>Factor de potencia 90%</p>	<p>0.2 MW hasta 130 MW</p> <p>Temperatura 250 oF a 350 oF</p> <p>Modulares y fijas.</p> <p>Velocidades 1800 rpm en adelante</p> <p>Eficiencias de 88%</p>	<p>Módulos hasta 30MW.</p> <p>77.5 MW para 60Hz y 110 MW para las áreas 50Hz.</p> <p>Factor de potencia 80%</p>

Ventajas	Puesta en marcha rápida.	Experiencia, empresa que se remonta en los años 1913.	Desarrolla una serie de mini plantas portátiles de tamaño pequeño, siendo un tipo turbina generador.	línea completa de las pequeñas turbinas de vapor	Se encuentran desarrollando turbinas que funcionan con un mínimo de pérdida y una mayor eficiencia.	40 años de experiencia.	Turbinas de vapor geotérmicas más grandes del mundo.
	Funcionamiento económico.			Garantizando la fiabilidad en el diseño y excelente rendimiento.	Las más vendidas a nivel mundial.	Menor impacto medio ambiental.	
	Construcción robusta.	Construcción robusta.	fácil transporte, operación, mantenimiento, alto rendimiento y alta fiabilidad,		Expertos en sistemas de generador de turbina, caldera y sistemas de control de emisiones.	Fácil transportar e instalar	Fácil instalación. (La turbina y el generador se envían mientras que un paquete respectivamente después de ser montados)
	Arranques a plena potencia incluso en frío.	Una variedad de series con condensador.		características únicas de los materiales en la construcción		Amplia gama de temperaturas	En los diez últimos años a ganado las licitaciones para 12 centrales geotérmicas.
						Necesidades rurales, localización remotas	
						Recursos del Eco-turista de Eco	

Tabla 5.2 resumen de características, ventajas y otros de fabricantes de turbinas geotérmicas. (Continuación)

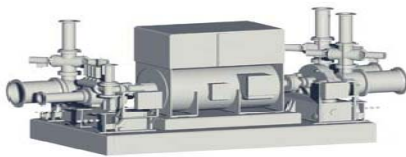
Otros:	El generador y los sistemas de instrumentación y control, así también como los sistemas auxiliares y secundarios necesarios.	2163 MW instalados. El diseño estándar es de una unidad, con la posibilidad de la ampliación de la planta mediante la adición de una segunda unidad. ISO 9001:2000 e ISO 14001:1996	Ha sido la segunda empresa en ventas de turbinas para la producción de energía geotérmica en el mundo entero. Se sigue perfeccionando en cuanto a eficiencia y nuevos tipos de materiales para las turbinas.	350 MW ordenados. 240MW producidos. Se encuentra alrededor del mundo, USA es el país más cercano al Ecuador. Poseen certificación ISO 9001 V200	71 unidades produciendo 1808.0 MW en más de 80 países. ISO 9001:2000 e ISO 14001:1996 paquetes de instalación personalizado que incluye: •Turbina de vapor •Generador •Separador de humedad •Extractor de gases •Sistema de refrigeración auxiliar	200 unidades produciendo 550MW Se encuentran unidades en todo el mundo. Tienen servicio técnico en Latinoamérica.	Poseen 1.558 MW, o el 17.5% de la capacidad instalada por todo el mundo.
--------	--	---	---	--	---	---	--

Para mayor detalla, contactos y especificaciones adicionales ver las referencias de las páginas de contacto de cada marca [41-49]

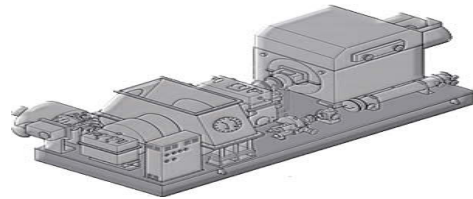


Market Share of Geothermal Units
Supplied Worldwide
(as of February, 1997)

Figura 5.5 Estadística de cómo se han repartido el mercado de las centrales geotérmicas hasta el año 1997 las diferentes empresas.



Turbina Siemens SST-120,



Turbina Toshiba tipo TPC

Figura 5.6 Ejemplo de turbinas modulares.[41-49]

Tabla 5.3 Características de las turbinas utilizadas en las distintas centrales geotérmicas.

País	Costa Rica	Nicaragua	Nicaragua	El Salvador	El salvador	México
Nombre	Miravalles, Unidad I, II y III Guanacaste	Planta Geotérmica San Jacinto Tizate.	Momotombo	Campo Geotérmico de Ahuachapán	Campo Geotérmico de Berlín I, II y III	Los Azufres II, Michoacán
Tipo	Simple flash-condensador	Simple flash	Simple y doble-condensador	Simple y doble - condensador	Simple , doble y binaria - condensador	Simple, doble y binaria – condensador
Presión de admisión (bar)	6	10	7	(1-2)4.6 (3) 5.6 1.5 bar-a en doble flash	10-12 1.5 bar-a en doble flash	8 2.5 bar-a en doble flash
Presión de descarga (bar)	I) 0.125 (II)0.10 (III)0.09	1	0.12	0.085	0.098	0.10
Temperatura de admisión (oC)	I) 159 (II)159 (III)157	180	165	(1-2)149 (3) 156	180	171
Fabricante	Mitsubishi	ACEC	Franco Tosi	Mitsubishi	Fiji	General Electric
Modelo		P 2203	T.V.W 16 GDF 60			
Velocidad de rotación (rpm)	3600	6183	3600	3600	3600	3600

Tabla 5.3 Características de las turbinas utilizadas en las distintas centrales geotérmicas. (Continuación)

Flujo de masa vapor (kg/s)	I) 106.4 (II)101.6 (III)56	-----	16	1-2)114 las dos (3)48	52	81
Potencia (MW)	(I) 55 (II)58 (III)27.5	5	35	(1-2)79 (3)30	(I y II) 53 (III) 40	25
Factor de potencia.	90%	80%	90%	(1-2)85% (3)87.5%	85%	90%
Otros	I solo cilindro, salida doble. I) 6 etapas (II)6 etapas (III)5 etapas	Paleteado (doble flujo) 16 etapas de paletas de reacción (8 etapas por cada flujo). Rotor excitación Brushless	Paleteado (doble flujo) 16 etapas de paletas de reacción (8 etapas por cada flujo).	(1-2)Cinco etapas tipo impulso. (3) 7 etapas del tipo de reacción. Extracción de gases del tipo "eyector" generador síncrono con excitación sin escobillas	Eyectores de doble etapa para la extracción de gases no condensables. generador síncrono con excitación sin escobillas	Simple flujo, de 7 etapas tipo impulso. Generador síncrono sin escobillas. Sistema híbrido para la extracción de gases no condensables.

La fuente de información referirse a la tabla 4.2 y 4.3 última fila. -----: Datos nos disponibles

Para este proyecto lo que conviene son los módulos compuesto por turbina-generador con todo el paquete adicional que viene junto, estos módulos la mayoría de marcas los construyen hasta unos 30 MW de potencia. Son fáciles de transportar; minimizan los daños a los ecosistemas; son fáciles de instalar; no requieren mucho mantenimiento; son precisos para proyectos pilotos donde una vez cumplida con la parte de prefactibilidad se los retira y se los instala en otro lugar.

Dentro de los modulares, la marca que más vende es Mitsubishi con un completo paquete de instalación. Luego le siguen por su gran desarrollo tecnológico y especial interés en pequeñas centrales geotérmicas Toshiba y Fuji. Si hablamos de experiencia la empresa Ansaldo Energía con más de 100 años de experiencia. Las demás son líderes en ventas y especializadas en sus países como General Electric, Siemens, Ormat, esta ultimas se encuentra en países centro americanos compitiendo en cada licitación con Mitsubishi y Fuji.

En Cuanto a servicio técnico, garantías y demás todas ellas lo ofrecen, pero la que más se ha desarrollado en los últimos años con un crecimiento mayor para próximos años es Fuji con la turbina más grande del mundo.

Mitsubishi conjuntamente con General Electric están desarrollando turbinas más eficientes y de mejores materiales.

Con la tecnología que cada día es mejor, se han logrado construir turbinas más eficientes que las de años anteriores, con materiales de mejor calidad, sistemas más complejos y para variadas aplicaciones, como ejemplo es la marca Mitsubishi, principal constructora de turbinas geotérmicas.

Para cuando se llame a licitación para la compra o construcción de modulares de 15 MW las opciones son varias y dependerá exclusivamente de cómo las empresas oferten factores como:

- Tiempo de entrega.
- Precio.
- Servicio técnico.
- Garantías.
- Características únicas como las ventajas competitivas.
- Otros, como: prestamos, tiempo de cobros, asesoría, etc.

Materiales

Dado que los efectos corrosivos de los fluidos geotérmicos dependerán de la composición química de los geo-fluidos, a menudo se considera prudente llevar a cabo pruebas antes de decidir sobre la selección de materiales de cada uno de los elementos de la planta, y de manera especial de los materiales que componen las partes principales de la turbina.

En el rotor se aconseja utilizar un acero fundido con ciertas cantidades de Níquel o Cromo (12% Cr, 6% Ni, 1.5% Mo) para darle tenacidad, en donde normalmente las ruedas donde se colocan los álabes se acoplan en caliente al rotor, pero también

se pueden fabricar haciendo de una sola pieza forjada al rotor, maquinando las ranuras necesarias para colocar los álabes.

Para los álabes se utilizan aceros inoxidables (403, 13% Cr), aleaciones de cromo-hierro, con las respectivas curvaturas de diseño según los ángulos de salida de vapor y las velocidades necesarias. Se debe indicar que las últimas etapas de la turbina son las más críticas por la posibilidad de existencia de partículas de agua que erosionarían a los álabes, para lo cual, se fija una cinta de metal satélite con soldadura de plata en el borde de ataque de cada álabe para retardar dicha erosión.

En la carcasa que contiene la parte interior, unida a la bancada y la parte superior, desmontable para el acceso al rotor, que contienen acero o aleaciones de este, que dependen de la temperatura de trabajo, obviamente las partes de la carcasa de la parte de alta presión son de materiales más resistentes que en la parte del escape. Normalmente se encuentra recubierta por una manta aislante que disminuye la radiación de calor al exterior, evitando que el vapor se enfríe y pierda energía disminuyendo el rendimiento de la turbina.

Tabla. 5.4 Materiales típicos de los elementos de la turbina [1]

ELEMENTO	MATERIAL
Tubería	ASTM A106, Gr B; ASTM A335, GrP11 o P22
Carcasa de alta presión	ASTM A356, Gr 1, 6, 9 o 10
Carcasa de baja presión	ASTM A285 o A515
Válvula	ASTM A216 o A217
Sujetadores	ASTM A193 o A194
Rotor	ASTM A470
Álabes	AISI 403
Álabes de la tobera	AISI 403

5.1.4 VIDA ÚTIL.

La vida útil de una turbina está dada:

Por el fabricante, la cual, es una estimación donde se involucra muchas disciplinas de tipo analítico, numérico y experimental. Durante la generación de la energía eléctrica requerida en el país se realizan operaciones como:

- Arranques
- Paros
- Cambios de potencia de los turbogeneradores.

Dichas operaciones transitorias provocan que ciertos componentes críticos de las turbinas, como los rotores, sean sometidos a ciclos de esfuerzos térmicos repetitivos, lo cual consume su vida útil.

Por una evaluación de vida útil remanente, es imperativa para garantizar su integridad estructural y una operación confiable de las unidades. Por otro lado, durante la operación diaria, las turbinas y sus rotores están expuestos a padecer eventos tales como:

- Inducción de agua
- Rozamiento
- Amarre de chumaceras
- Rechazos de carga

Que causan un daño importante y disminuyen significativamente la vida útil remanente del rotor. Estos componentes también se someten a esfuerzos térmicos, además de esfuerzos centrífugos. La frecuente ocurrencia de transitorios (ciclos) térmicos dan como resultado la presencia de altos esfuerzos que producen un daño en el material del rotor, que, al acumularse, puede conducir a fallas, inclusive catastróficas.

Vida útil remanente a través del análisis del aceite.

En cuanto a la vida útil o remanente de un aceite, es el tiempo de funcionamiento del aceite en una maquina (turbina), hasta que sus propiedades varíen de tal manera que afecten al buen funcionamiento de cada uno de los elementos que conforman la turbina y que a su vez requieren de dichas características para evitar la fricción, recalentamiento, etc; aumentando de esta manera la eficiencia del sistema que lo conforman.

Un aceite de turbina tiene una duración aproximada de 10-20 años dependiendo de la calidad del aceite y del tipo de servicio como de las características del fluido con que la turbina tiene que trabajar.

5.2 SEPARADOR DE VAPOR

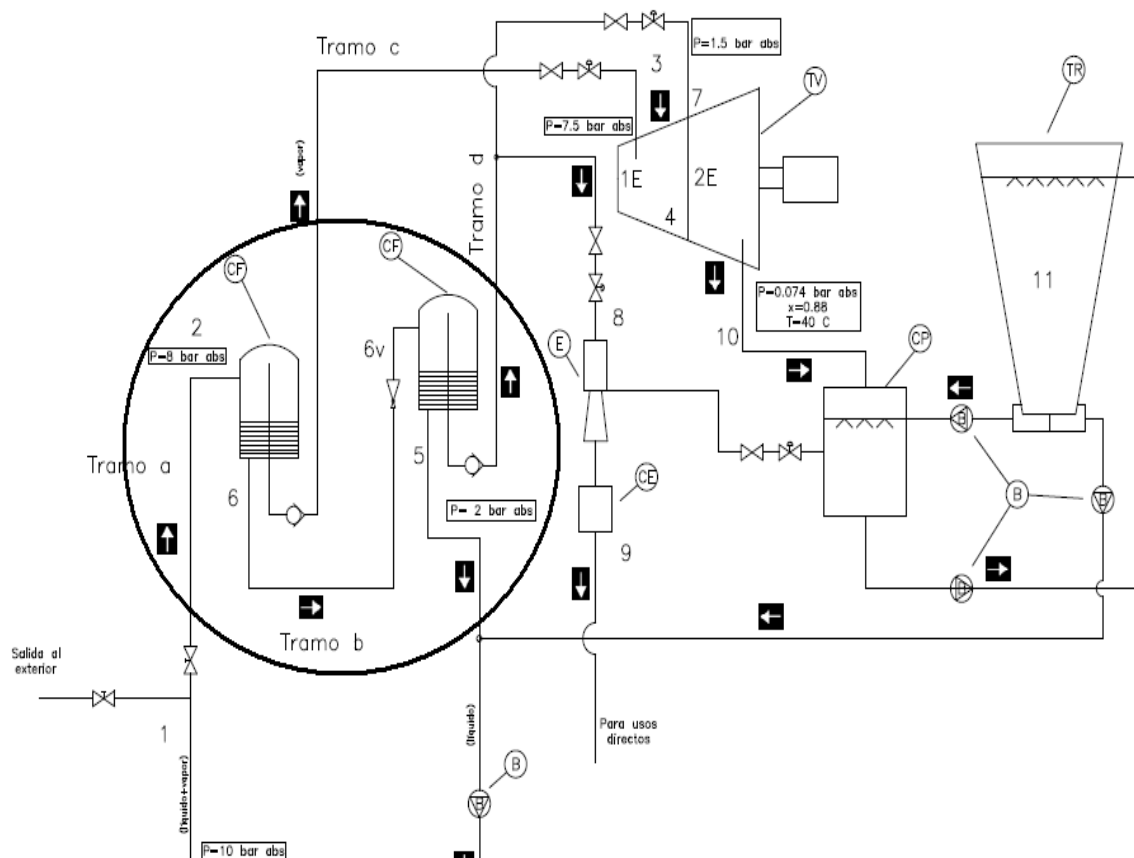


Figura 5.7 Ubicación de los separadores dentro del esquema final. (Mayor detalle ver anexo 3).

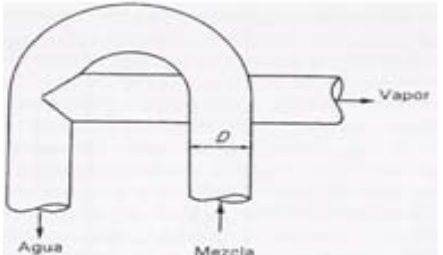

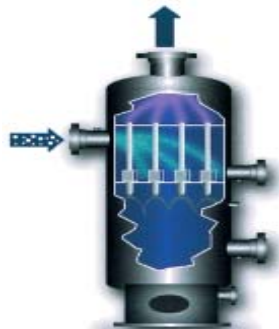
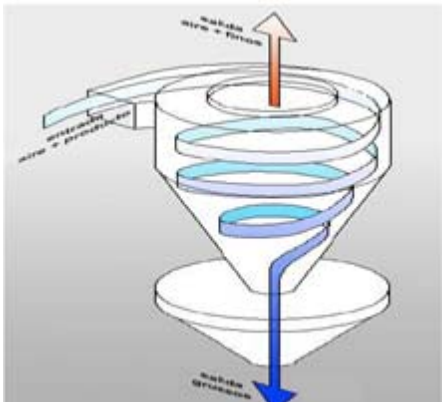
5.2.1. CARACTERÍSTICAS Y TIPOS DE SEPARADORES PARA LA CENTRAL DE CHACHIMBIRO

5.2.1.1. Características

- Se usan básicamente para separar el vapor del agua con la viene del pozo geotérmico.
- Este elemento es muy versátil puede adaptarse a todo terreno, lugar y central de producción de energía.
- Dependiendo del material sus costos varían, lo que a su vez depende del tipo de fluido a separar.
- En la geotermia se usa mucho los separadores ciclónicos por su gran eficiencia se habla que separan la mezcla agua-vapor en más de un 95% ayudando así a mejorar la eficiencia del sistema y alargando la vida útil de las turbinas.
- Al diseñar un separador cual quiera que sea, se debe considerar las pérdidas de calor en el mismo, esto se hace cuando los separadores son muy grandes y el recorrido de la mezcla es muy largo; en separadores pequeños (cantidad de caudal que pasa por el mismo) se pueden hacer calcular sencillos y rápidos simplemente tomando en cuenta la eficiencia teórica que se puede alcanzar en cada uno de sus tipos.
- El lugar que ocupan dentro de un sistema de generación eléctrica siempre será antes del ingreso del vapor a la turbina y el número de ellos dependerá del número de etapas que posea la turbina. En muchos casos para mejorar la eficiencia de separación también se introducen separadores entre etapas de las turbinas o las salidas de las mismas.

5.2.1.2 Tipos de separadores para la central de Chachimbiro

Tabla 5.5 Selección del separador

Tipo de separador	Ventaja	Desventaja
<p>Separador de vuelta en "U".-</p> 	<p>Simple tubo en u 180 grados en un campo húmedo</p>	<p>Eliminar del 80 al 90% de agua</p>
<p>Separador Webre.-</p> 	<p>más elaborado que el separador de vuelta en "U", uno de los más baratos y más eficaces 99.9 % Aceptado favorablemente en varios campos húmedos. Tipo ciclónico</p>	<p>Velocidad de la entrada alrededor de 50 m/s Diámetros interiores varían de 76 a 137 cm</p>
<p>Separador Peerless.</p> 	<p>evita el desequilibrio de fuerzas que existe en el separador Webre</p>	<p>Muy poco usado en la actualidad</p>
<p>Separadores ciclónicos</p> 	<p>Gran variedad de eficiencia, materiales. Son los más usados en la actualidad Son económicos.</p>	<p>Si no se hace un diseño adecuado presenta perdidas. Si no se tiene una válvula de seguridad se puede inundar en un exceso de caudal.</p>

Los ciclones son uno de los equipos más empleados dentro de las operaciones de separación de partículas sólidas de una corriente gaseosa, además de poder emplearse para separar líquidos y gases. Su éxito se debe en parte a que son equipos de una gran sencillez estructural debido a que no poseen partes móviles y a que apenas exigen mantenimiento.

Además se destaca el hecho de que, al hacer uso de fuerzas centrífugas en vez de gravitatorias, la velocidad de sedimentación de las partículas se incrementa en gran medida haciéndose más efectiva la separación.

Se puede emplear tanto para gases cargados de polvo como de niebla, es decir, para pequeñas partículas líquidas como con los hidrociclones.

Los ciclones convencionales se pueden encontrar en una gran variedad de tamaños y la entrada al equipo puede ser bien rectangular o circular. Una forma de clasificar los distintos tipos se puede efectuar atendiendo a la manera en que se produce la carga y la descarga del equipo y otro modo sería en función de su eficiencia.

En función de su eficiencia, la misma está determinada en gran medida por su tamaño. Es decir diámetro y altura.

- Muy eficientes (95- 99%)
- Moderadamente eficientes (70- 80%)
- De baja eficiencia (50%)

Ventajas:

- No disponen de elementos móviles que precisen mantenimiento.
- Su aptitud para trabajar a altas presiones y temperaturas
- Su fácil construcción.
- Su bajo costo
- Su alta eficiencia,
- La posibilidad de tratar prácticamente todos los gases y materiales sólidos

- Menor carga de trabajo a filtros de mangas (filtros más pequeños, menos m^2 de tela filtrante, mayor duración de las mangas)

5.2.2 BALANCE ENERGÉTICO

El balance energético del separador utilizado en el esquema final se lo puede ver en el anexo 2. En esta sección se muestra las formulas y los cálculos teóricos de un separador a manera de ejemplo numérico explicativo.

La destilación flash o destilación en equilibrio, es una técnica de separación de una sola etapa. La mezcla entra a un volumen suficientemente grande (tambor de separación) donde el líquido y el vapor se separan. Como el vapor y el líquido están en un estrecho contacto, ocurre que las dos fases se aproximan al equilibrio.

Balances de masa y energía de forma teórica.

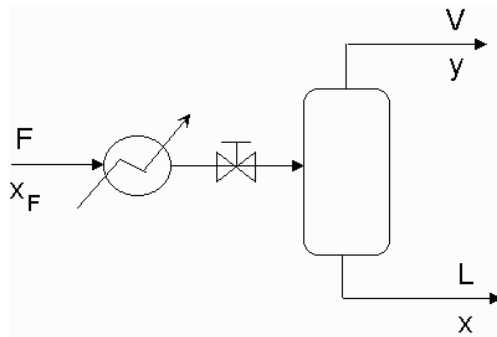


Figura 5.8 Disposición esquemática del separador de vapor – agua Cicloide. [54]

En el esquema que se muestra, F es la mezcla que se desea separar, formada por dos compuestos A y B . x_F es la fracción molar del compuesto más volátil de la mezcla (esta es una convención). V y L son las fases vapor y líquido. x y y son las composiciones del compuesto más volátil en cada fase. Se considera que estas composiciones están en equilibrio.

De acuerdo con lo anterior y considerando un estado estacionario, el balance de masa general:

$$F = V + L \quad (21)$$

y el balance del componente más volátil será:

$$F x_F = V y + L x$$

Mientras que el balance de energía es:

$$F h_F + Q = V H + L h$$

Donde H_f es la entalpía de la mezcla de alimentación, h la entalpía de saturación de la fase líquida (entalpía en el punto de ebullición o punto de burbuja), H la entalpía de saturación de la fase vapor (entalpía del punto de rocío) y Q el calor que se suministra en el intercambiador (o el que se retire en el caso en que la alimentación sea un vapor).

Técnicas de cálculo

Para resolver un problema de destilación flash, debemos resolver simultáneamente las ecuaciones de operación y de equilibrio. Estos cálculos se pueden hacer directamente, pero usualmente requieren un proceso iterativo. Las técnicas gráficas son comunes para evitar estos engorrosos procedimientos. A menudo, la elección de la técnica depende de la forma de representar el equilibrio que se encuentre disponible.

Para este estudio no se usan los términos para sustancias volátiles ya que la separación más importante es la de vapor-agua en las centrales geotérmicas sin descartar la presencia de sustancias como metano, pero son en cantidades tan pequeñas que suelen despreciarse para este cálculo básico.

EJEMPLO: Una mezcla de, se alimenta a un proceso de flash continuo a 1 atm. de manera que se vaporice el 60% de la carga original. Cuál será la composición de los productos líquido y vapor?

²¹ Todas las formulas comprendidas en el ejemplo son obtenidas del mismo libro pertenecientes a un separador de vapor-agua, detalle en referencia [54]

Tenemos que: $f=0.6$

Base de cálculo: 100 moles de alimentación

Si aplicamos el balance de masa:

$$V = fF = 0.6 \cdot 100 = 60$$

$$L = F - V = 100 - 60 = 40$$

5.2.3 SELECCIÓN Y MATERIALES

Selección de los separadores

El comportamiento de los separadores ciclónicos es muy complejo, ya que existe relación directa entre varias características. Una de ellas es la relación directa entre la velocidad de entrada del separador y el tamaño de este, la velocidad también está en relación directa con la eficiencia del ciclón, ya que a medida que esta aumenta la eficiencia también. Por otro lado, también se genera mayor caída de presión y con esto se infiere mayor consumo de potencia para el ventilador que utiliza este equipo. Los separadores ciclónicos la incomparable ventaja de poder trabajar con gases a altas temperaturas a costos razonables

Especificaciones necesarias para la selección de un separador ciclónico

- Eficiencia:
 - Estándar (Hasta el 90%)
 - Alta (Mayor al 90%)
- Construcción:
 - Ligera
 - Pesada
- Diseño:
 - Normal
 - Especial
- Diámetro del cuerpo

- Arreglo (giro del aire en el interior visto desde arriba):
 - Derecha
 - Izquierda

Datos necesarios para la selección de un ciclón

- Descripción de la aplicación
- Temperatura de la mezcla
- Flujo de la mezcla
- Presión de la mezcla
- Análisis de la composición del fluido
- Altitud del lugar donde va a ser instalado
- Temperatura del ambiente

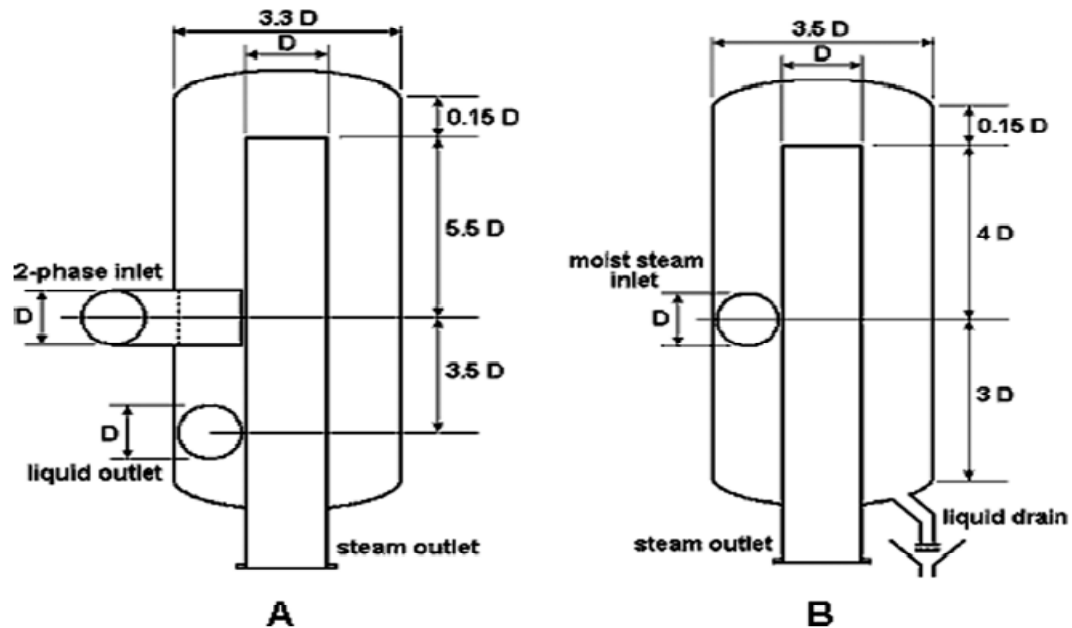


Figura 5.9 a) especificaciones para el diseño de un separador cicloide. b) especificaciones para el diseño de un separador cicloide vapor-particulado [6]

Tabla 5.6 parámetros de diseño de un separador cicloide y del removedor de partículas.

Parameter	Separator	Moisture remover
Maximum steam velocity at the 2-phase inlet pipe	45 m/s (150 ft/s)	60 m/s (195 ft/s)
Recommended range of steam velocity at the 2-phase inlet pipe	25–40 m/s (80–130 ft/s)	35–50 m/s (115–160 ft/s)
Maximum upward annular steam velocity inside cyclone	4.5 m/s (14.5 ft/s)	6.0 m/s (20 ft/s)
Recommended range of upward annular steam velocity inside cyclone	2.5–4.0 m/s (8–13 ft/s)	1.2–4.0 m/s (4–13 ft/s)

Fuente: Ver referencia [6]

Materiales

Los separadores pueden formarse con cualquier material apropiado que sea resistente al ataque o corrosión por parte de las mezclas de gas susceptibles de ser separadas en condiciones de funcionamiento. Pueden usarse metales, tales como acero inoxidable y aluminio, y aleaciones de níquel y cromo. No obstante, a menos que el metal pueda fundirse, es difícil conformarlo en pequeños tamaños, en tal caso se prefieren materiales de cerámica, vidrio y plástico que son fuertes, resistentes a la presión y capaces de retener su forma bajo las presiones de gas con las que van a trabajar.

Los productos detallados a continuación son separadores del tipo de deflector usados para eliminar líquidos arrastrados por el vapor, aire comprimido o gas. Recomendamos la instalación de camisas de aislamiento para incrementar el rendimiento del separador.

Tabla 5.7 Tabla de materiales, rangos de presión, tamaños y tipo de conexiones de separadores

Material	Rango presión	Tamaños	Conexiones
Fundición nodular	PN16	½", ¾" y 1"	Roscado
Hierro fundido	PN16	1¼", 1½" y 2"	Roscado
Hierro fundido	PN16	DN40 - 200	Bridas
Acero al carbono	PN50/ANSI 300	DN15 - 80	Roscado y Bidas
Acero inoxidable austenítico 316L	PN50/ANSI 300	DN15 - 80	Roscado y Bidas
Acero al carbono	PN16 y PN40	DN65 - 150 DN200 - 350	Bridas Bridas
Acero inoxidable austenítico 316L	PN16 y PN40	DN65 - 150 DN200 - 350	Bridas Bridas
Fundición nodular	PN25	1¼", 1½" y 2"	Roscado
Fundición nodular	PN25	DN40 - 200	Bridas

Fuente: Ver referencia [1]

En nuestro país existen empresas como: Acindec, y Acero de los Andes que cuentan con la infraestructura y tecnología necesarias para diseñar y construir los separadores flash utilizados en plantas geotérmicas.

5.2.4 VIDA ÚTIL

El funcionamiento seguro de estas unidades sólo puede garantizarse si su instalación y puesta en marcha se realiza correctamente y el mantenimiento lo realiza una persona cualificada según las instrucciones de operación. También debe cumplirse con las instrucciones generales de instalación y seguridad de construcción de líneas y plantas, así como el uso apropiado de herramientas y equipo de seguridad.

Aislamiento.- Considerar si el cerrar las válvulas de aislamiento puede poner en riesgo otra parte del sistema o a personal. Los peligros pueden incluir: aislamiento

5.3.1 CARACTERÍSTICAS:

Los condensadores dependen de características particulares, originadas de cada lugar donde se piense ubicarlos, como:

- Disponibilidad de agua fresca. (Ríos, lagunas, represas, etc.)
- Los factores meteorológicos.
- La tecnología que se dispone en el medio.

Para ser generado el vacío se usa sistemas mecánicos como los extractores o por medio de eyectores activados por el mismo vapor geotérmico o por agua a alta presión que se verá con más detalle en la sección 5.6.

Condensador de contacto directo o de chorro.- Este tipo de condensador trabaja en paralelo, es decir, que el vapor, el agua refrigerante y los gases no condensables circulan en el mismo sentido.

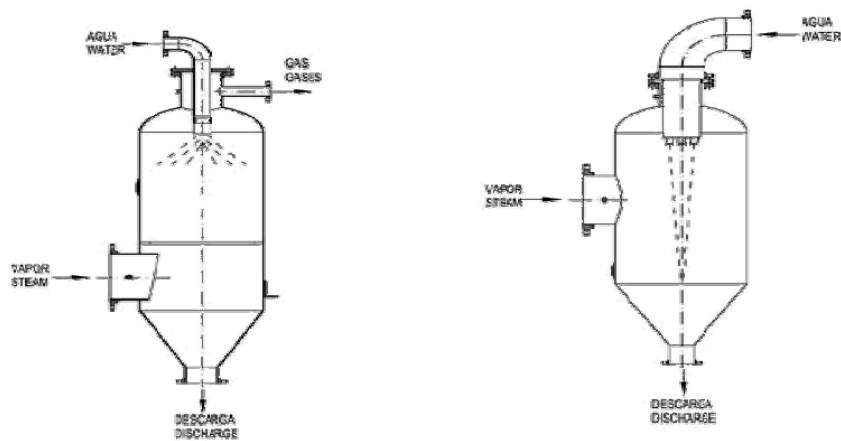


Figura 5.11 Esquema de un condensador tipo chorro de contacto directo, donde se muestra su funcionamiento y la estructura. [2]

Ventajas:

- Son estructuras más simples dentro de los condensadores usados en la geotermia.

- Este tipo de condensadores son más eficiente que el caso anterior debido a que al estar en contacto directo los dos fluidos la resistencia al intercambio de calor es menor.
- Pueden conseguir temperaturas más bajas que los de coraza-tubo y su mantenimiento es mucho más simple y sencillo.

Desventajas:

- No puede reciclarse el condensado por estar el vapor geotérmico con el agua fresca mezclados.
- El consumo de agua fresca es muy elevado.

Condensadores es el barométrico, es una variación del tipo anterior, el cual la diferencia esencial es que mantiene al condensador a baja presión para de esta manera maximizar la energía extraída por el vapor. Para esto se utiliza una bomba de extracción de condensado o bien una columna barométrica, que consiste en una carcasa, fosa o recinto dentro del cual cae una en forma de ducha el agua fría, mientras que el vapor circula en contra corriente, para ser los dos fluidos descargados conjuntamente en el fondo de dicho recinto.

La columna barométrica ayuda a reducir el consumo interno del condensador, la idea es situar al condensador a una altura o nivel superior al depósito del mismo.

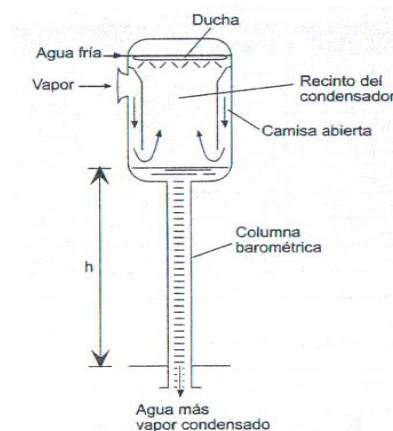


Figura 5.12 Esquema de un condensador tipo barométrico de contacto directo, donde se muestra su funcionamiento y la estructura. [2]

5.3.2 BALANCE ENERGÉTICO

El balance energético del condensador utilizado en el esquema final se lo puede ver en el anexo 2. En esta sección se muestra las formulas y los cálculos para un condensador a manera explicativa usando el mismo ejemplo de la sección 5.1.2.c.

El fluido al salir de la turbina a una presión p , a otra temperatura que la de ingreso con lo cual el fluido cambia su estado y es una mezcla liquido-vapor que va un condensador para disipar el calor de dicha mezcla.

De manera teórica el calor que debe extraer el condensador está dada por:

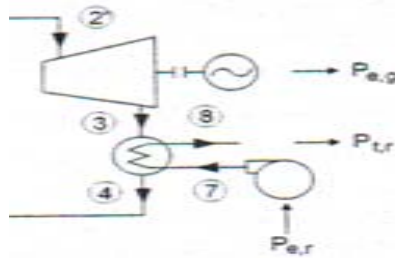


Figura 5.13 Representa esquemáticamente los puntos usados para encontrar El calor disipado en el condensador dentro de un sistema geotérmico básico de doble flashing

$$P_{t,r} = Q(h_3 - h_4) \quad (22)$$

Tabla 5.8 Caudales de extracción, al condensador, requerido para enfriar; temperatura a la salida y potencia térmica extraída por el condensador usando las características del ejemplo numérico de la caja negra de la turbina con condensación y extracción intermedia (ver seccion5.1.2.c).

Nivel de trabajo	Cantidad de calor disipado por el condensador del ejemplo de la sección 5.1.2.c P_t (KWt)
Pmax.	2400
Pmin.	253

²² Todas las formulas empleadas en el balance energético mediante un ejemplo son obtenidas del mismo libro, más detalle ver referencia [2]

Mientras mayor sea la cantidad de potencia térmica que tenga que disipar el condensador será mayor la cantidad de agua para refrigerarla.

Mientras más eficiente sea el condensador, esto es mientras más cantidad de vapor entre en contacto con el agua fría, se reducirá el gasto de agua fría. Por ello en los diseños de condensadores de contacto directo se los hace en forma de duchas con aspersores, los cuales permiten una mayor superficie de contacto, además esta eficiencia propia del sistema debido al tipo de materiales y a las pérdidas de calor que se dan con el exterior.

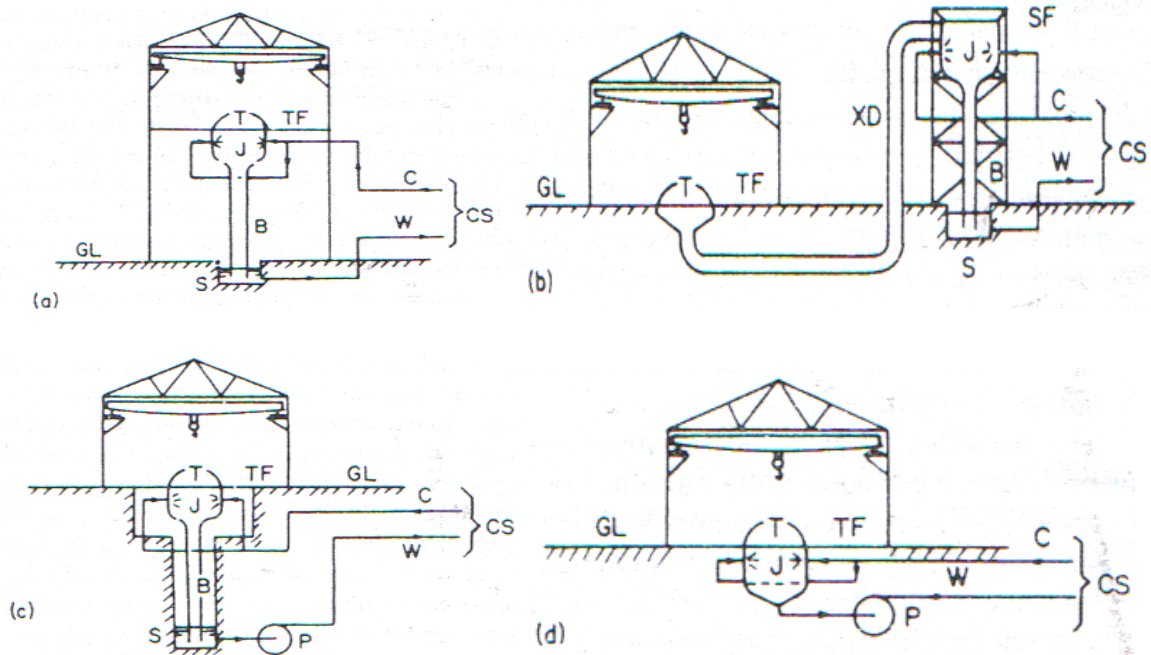
5.3.3 SELECCIÓN Y MATERIALES

En las centrales geotérmicas al no poseer caldera para calentar el fluido, las turbinas con condensación que se utilizan para la producción de energía eléctrica no requieren o necesitan estar conectadas a condensadores de superficie que son muy costosos. El tipo más usado es el condensador de chorro, por ser relativamente más baratos. Este ahorro se debe principalmente por la ausencia de tubos.

Cuando existe altos niveles de ácido sulfhídrico en la extracción del vapor geotérmico, es indispensable la utilización de condensadores superficiales a pesar de su alto costo, ya que de no ser así, la contaminación que produce dicho ácido al medio ambiente sería irreparable.

Cada instalación de turbinas está diseñada para funcionar a toda fuerza con un vacío, definido. El vacío de diseño para cualquier instalación particular de máquinas puede ser obtenido de los manuales respectivos.

En la actualidad hay varios tipos de arreglos condensador/turbina, estos han dependido exclusivamente de los diseñadores de cada una de las épocas en las que se hicieron:



T, Turbina J, Condensador de chorro B, Tubo barométrico S, Sumidero GL, Nivel del terreno C, Agua fría W, Agua tibia XD, Ducto de escape TF, Piso de turbinas P, Bomba SF, Estructura de soporte CS, Sistema de enfriamiento (es decir bombas, río, lago, torre enfriamiento, etc.).

Altura en el tubo barométrico arriba d nivel del agua en el sumidero = casi 9 a 10 m según el vacío

Figura 5.14 Diferentes arreglos de condensadores de chorro y turbinas geotérmicas, a) Turbina de alto nivel: b) turbina de bajo nivel, condensador externo: c) fosa condensador: d) uso de bomba de extracción para ahorrar altura. [1]

La figura 5.14.a. es utilizada en la central de Wairakei, la ventaja es que es de fácil acceso y la desventaja que el edificio es de una gran altura, que en caso de estar en una área sísmica, esto encarecería la estructura por el tipo de acero.

La figura 5.14.b. es el esquema más utilizado alrededor del mundo, en países como: USA, Japón, México y Rusia. La ventaja es que el consto de construcción es bajo, y la desventaja es la elevada estructura externa para el condensador y el tubo barométrico. Un costoso vapor ducto, resistente a la corrosión, manteniendo purgado por una bomba de extracción, difícil acceso y por último es susceptible a congelarse.

La figura 5.14.c. es el empleado en la central de Larderello, esta es una solución combinada relativamente económica en cuanto a los costos de construcción pero requiere la instalación de un pozo profundo para el tubo barométrico y del empleo de una bomba de extracción para el agua tibia.

La figura 5.14.d. es otro arreglo combinado, usado en las últimas unidades fabricadas en los Géiseres, USA, donde se evita hacer el pozo profundo, pero se requiere de una bomba de extracción del condensado más grande que en los anteriores casos.

En centrales geotérmicas de Centroamérica como ejemplo tenemos:

- Berlín, El flujo de agua en el condensador es de 6,480 m³/h a una temperatura de 29 °C. La mezcla de agua y condensado en el condensador alcanza una temperatura de alrededor de 42.4 °C a una presión de operación del condensador de 0.098 bar-a y disponen de eyectores de doble etapa para la extracción de gases no condensables. Para las dos unidades a condensación instaladas en la planta son marca Fuji de 28.1 MW cada una, ambas de una sola entrada de presión (10 bar-a).
- Ahuachapán, A la salida de turbina se localiza un condensador del tipo barométrico de contacto directo en donde se rocía agua líquida proveniente de una torre de enfriamiento de cinco celdas del tipo flujo cruzado tiro forzado. El flujo total de agua de enfriamiento es aproximadamente 8,650 m³/h a una temperatura ambiente de 27 °C, la presión promedio del condensador es de 0.085 bar-a. En el condensador se encuentra un sistema de extracción de gases del tipo “eyector” que posee un sistema de enfriamiento que enfría 0.2% en peso de los gases no condensables que entran junto con el vapor geotérmico. La energía producida de esta planta es producto de la operación de dos unidades a condensación de una entrada de presión (single flash) de 30 MW cada una, ambas de la marca Mitsubishi.
- Los Azufres, es de contacto directo a presión de 0.1bar y esta diseñada por la empresa Ecolaire para una producción de 25 MW.
- Miravalles:

Tabla. 5.8.b Características de los condensadores usados en cada unidad de Miravalles

	Unit 1	Unit 2	Unit 3
Type	Single flash	Single flash	Single flash
Condenser:			
type	DC, low-level	DC, low-level	DC
CW flow, kg/s	4,233.6	4150	2,143
CW temperatures, °C:			
inlet	28.9	28.9	27.4
outlet	49.4	47	40.8
wet-bulb	21.7	21.7	21.7

Fuente: Geothermal Power Plants, Second Edition Principal Applications, Case Studies and Environmental Impact, 2005.

Como se puede observar al pedir una turbina, el condensador entra o es parte del paquete de la misma, por lo cual los fabricantes de turbinas son los mismo que se encargan de diseñar y entregar el condensador (turbina-generador); en casos excepcionales como de alta producción (>50 Mwe), el diseño del condensador se lo hace de manera paralela a la de la turbina o bien por alguna decisión de cambio o mejoría en el transcurso de la operación del equipo.

En este caso la mejor opción será la de un condensador de chorro que es el más utilizado alrededor del mundo por su economía en el costo de construcción, solo necesita de un eyector para mantener el vacío en el condensador.

En cuanto a los condensadores superficiales y de aire, el de chorro es el más barato, mayor aplicación en la geotermia y de excelente resultado.

Los rangos promedio de diseño para las temperaturas de entrada y salida del condensador son: 40-50 °C y de 25-30 °C respectivamente para simple flashing.

Materiales

Los materiales empleados dependen de varios factores, a saber: propiedades mecánicas, resistencia química, consumo y pureza del producto. Los materiales pueden ser: Aceros al carbono, Aceros inoxidables (304L, 316, 321), Inoxidada 90 ó 3P,

Cobre, Níquel, Monel, Titanio, P.V.C., Resina, Nylon, Polipropileno, Vidrio, Cerámico, P.T.F.E., Polietileno, Grafito.

5.3.4 VIDA ÚTIL.

Quien determina la vida útil de los condensadores es el fabricante con sus especificaciones propias de construcción, elaboración y resistencia propia de sus materiales; también dependerá:

- El tipo de manejo que se dé al sistema, esto es sin funcionamientos abruptos, golpes de presión, paradas repentinas, arranques a muy bajas presiones.
- El tipo de fluido que se tenga si es uno muy abrasivo se deberá realizar un tratamiento mucho antes de ingresar a las turbinas.
- El mantenimiento del equipo, es mínimo, bastara con una limpieza anual de sus cañerías o si fuese necesario se lo hará más seguido.

Para prolongar la vida útil es importante tener claro lo que se debe buscar en un condensador:

- Inhibir la incrustación y eliminar la incrustación previa ya existente.
- Reducir la actividad microbiana para minimizar la formación de biopelículas.
- Evitar la formación de depósitos calcáreos y asegurar unas tuberías limpias sin obstrucciones
- Reducir niveles de corrosión para mejora la transferencia de calor
- Reducción en el uso del agua
- Eliminar la necesidad de tratamientos químicos

Es importante cuidar que el condensador permanezca exento de aire tanto como sea posible porque su presencia dificulta la transmisión del calor del vapor de agua al agua de circulación, restándole eficiencia al condensador.

Para alargar la vida útil las boquillas de los chorros que expulsan el agua fría para que se mezcle con el vapor son construidas de Bronce, claro esto aumenta el costo de los condensadores.

5.4 TORRE DE ENFRIAMIENTO

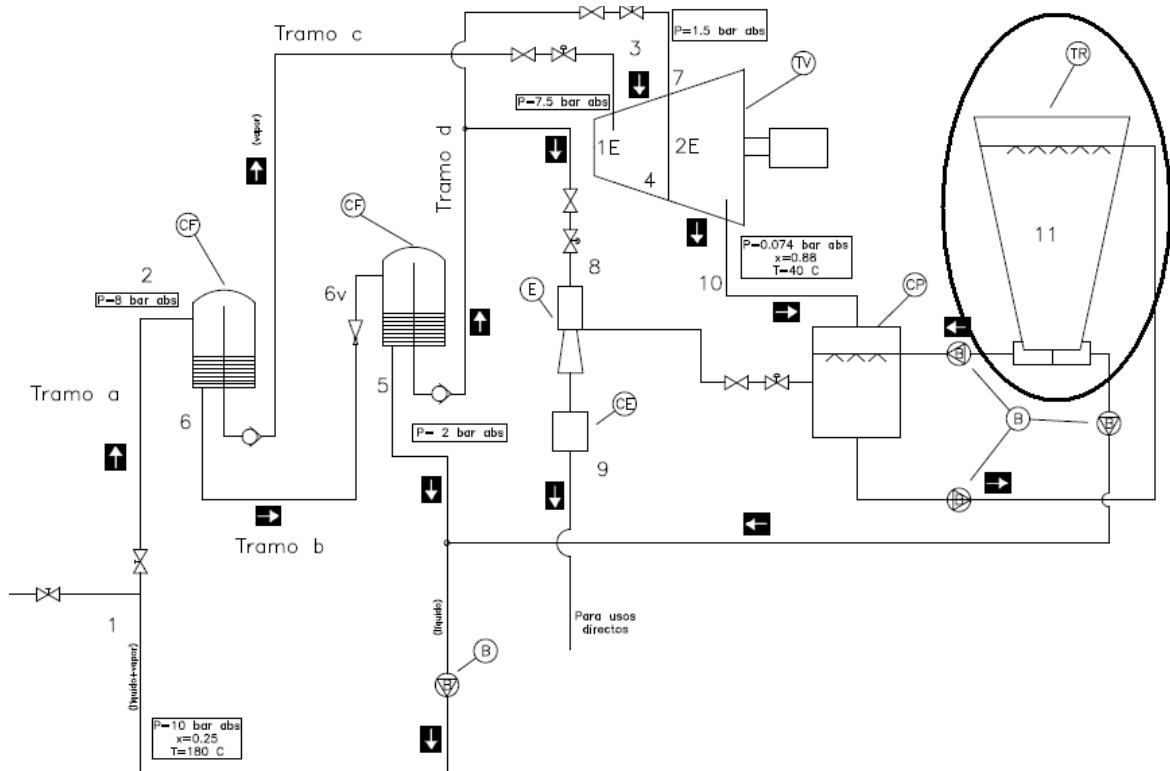


Figura 5.15 Ubicación de la torre de enfriamiento dentro del esquema final. (Mayor detalle ver anexo 3).

5.4.1 CARACTERÍSTICAS

En la mayoría de casos las torres de enfriamiento se utilizan después de un condensador, por ello son equipos destinados a enfriar agua. En base a ceder calor al aire por medio de su circulación se enfría el agua que cae por la torre.

Las torres de enfriamiento se utilizan cuando la fuente de agua fría es escasa o se ve muy afectada por la inserción del fluido utilizado en la generación de electricidad como en el caso de las centrales geotérmicas debido a dicho fluido puede tener sustancias contaminantes que pueden llegar a ser venenos para la vida humana y su entorno.

El agua que tiene que enfriarse generalmente tiene temperaturas entre 40 y 60 °C. El agua se bombea a la parte superior de la torre de enfriamiento y de ahí fluye

hacia abajo a través de tubos de plástico o madera. Esto genera la formación de gotas. Cuando el agua fluye hacia abajo, emite calor que se mezcla con el aire de arriba, provocando un enfriamiento de 10 a 40°C.

El agua que se pierde por evaporación dentro de una torre de enfriamiento generalmente no llega al 5% del total.

Normalmente de acuerdo a la experiencia de muchos fabricantes, las torres de enfriamiento trabajan con cargas de aire que oscilan entre 900 a 1800 lb/h·ft² y con cargas de agua entre 500 y 2000 lb/h·ft².

5.4.2 BALANCE ENERGÉTICO

El balance energético de la torre de enfriamiento utilizado en el esquema final se lo puede ver en el anexo 2. En esta sección se muestra las formulas y los cálculos para una torre de enfriamiento a manera de ejemplo explicativo basándonos en las características usadas en el ejemplo de la turbina con condensador de la sección 5.2.1.c (caja negra).

Teóricamente debe cumplir con la de refrigeración:

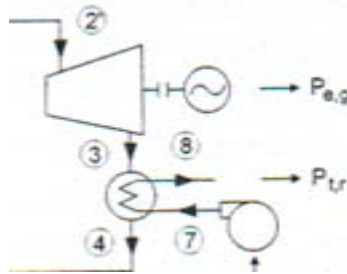


Figura 5.16 Representa esquemáticamente los puntos usados para encontrar El calor absorbido por el agua que viene desde la torre de enfriamiento dentro de un sistema geotérmico básico de doble flashing.

$$P_{tr} = Q_r(C_{pr})(T_8 - T_7)$$

Donde: P_{tr} Potencia de refrigeración que es igual al calor disipado por el condensador.

Q_r , es el caudal del fluido refrigerador dado en kg/s

C_{pr} Calor específico del mismo 4.18 kJ/kg °C

T_7 y T_8 , son las temperaturas de entrada (desde la torre de enfriamiento) y salida en grados centígrados respectivamente (hacia la torre de enfriamiento).

El aire a medida que va en ascenso por el mallado en el interior de la torre, se va calentado y humedeciendo al mismo tiempo que el agua que desciende por la misma malla se va enfriando y una pequeña fracción de la misma se evapora; el resultado de este fenómeno llamado transferencia de energía, agua-aire en forma de calor sensible es transmitido por convección y por el calor latente en forma de vapor.

El calor eliminado por la torre de refrigeración será igual a la expresión:

$$P_{t,r} = Q_w c_w (T_3 - T_4)$$

Donde:

Q_w , es el caudal de agua (kg/s),

c_w , es el calor específico del agua (4.18 kJ/kg °C),

T_3 , es la temperatura del agua a la entrada (°C) y

T_4 , es la temperatura del agua a la salida (°C).

Siguiendo con el ejemplo del condensador en el subcapítulo 5.1.2.c tenemos:

El caudal que llega a la torre de enfriamiento, por usar un condensador tipo de contacto directo, chorro (expuesto 5.3) será la suma del caudal del que refrigera más el de vapor que se une en dicho condensador y son llevados a la parte superior de la torre por una bomba.

Tabla 5.9 El caudal de agua necesario para refrigerar que va desde la torre e ingresa al condensador, usando las mismas característica del ejemplo de la sección 5.1.2.c y con los resultados obtenidos en el ejemplo explicativo del condensador tabla 5.8

Nivel de trabajo Del condensador	Pt valor medio del calor que disipa el condensador (KWt)	Temperatura de salida del condensador T_3 °C	Temperatura de entrada del condensador T_4 °C	Caudal necesario para refrigerar ver formula pág. 122-123. $kg/s (Q_w,)$
Pmax.	2500	35-50	15-30	29
Pmin	251			3

Para calculara el caudal de aire es necesario determinar ciertas condiciones y mediante el balance de entalpía alrededor de la torre de refrigeración usando los diagramas psicrométricos:

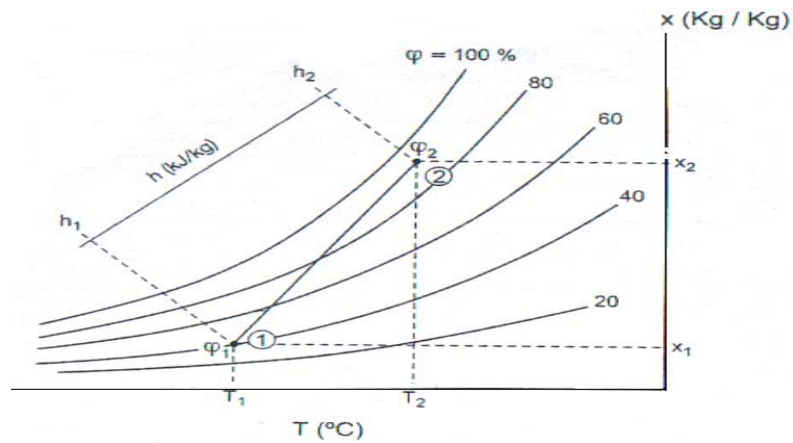


Figura 5.17 Representación sobre un diagrama psicrométrico, de la evaluación de aire húmedo al atravesar la torre de refrigeración. [2]

$$Q_a = Q_w c_w \frac{(T_3 - T_e)}{(h_s - h_e)} \quad (23)$$

Q_a , es el caudal de aire seco (kg/s),

h_e , es la entalpía específica de aire en las condiciones de entrada (kJ/kg), en Chachimbiro está entre 20 a 22°C.

h_s , es la entalpía específica de aire en las condiciones de salida (kJ/kg) esta entre 30 a 45°C.

$$Q_a = 30 \times 4.18 \frac{(35 - 21)}{(311 - 299)}$$

$$Q_a = 62.7 \text{ kg/s}$$

Consumo del agua de reposición:

$$Q_r = Q_a(x_2 - x_1) \quad \text{o bien} \quad Q_r = P_{t,r} \frac{(x_2 - x_1)}{(h_2 - h_1)}$$

x_1 , es la humedad absoluta del aire que entra (kg de agua/ kg de aire seco) en Chachimbiro esta entre 20 a 30%.

x_2 , es la humedad absoluta del aire expulsado (kg de agua/ kg de aire seco) menor al 40%.

$$Q_r = Q_a(x_2 - x_1)$$

$$Q_r = 139(0.30 - 0.25)$$

$$Q_r = 7 \text{ kg/s}$$

Si se requiere mover el fluido por el condensador se utilizará una bomba o ventilador:

$$P_{e,r} = Q_r v_r \Delta \rho_r / \eta_{b,r}$$

²³ Todas las formulas son utilizadas de la misma fuente, para evitar problemas con las nomenclaturas, más detalle de las misma ver en la referencia [2]

Donde:

$P_{e,r}$, Consumo eléctrico del sistema motobomba.

v_r es el volumen específico del fluido refrigerante dado en m^3/kg .

Δp_r Es la diferencia de presión entre bocas de aspiración e impulsión.

$\eta_{b,r}$ es la eficiencia del grupo motobomba o del ventilador de refrigeración.

Ejemplo de reposición de agua al descargarla de la turbina: si se alimenta una turbina a 7 ata y se descarga a un vacío de 4 pulg Hg con una eficiencia del 75% de la turbina, tomando del diagrama de Mollier que la humedad en la descarga es del 12.

Calor total de descarga a esa humedad sería:

$$=(0.88 \times 619.88) + (0.12 \times 51.65)$$

$$=551.69 \text{ kcal/kg.}$$

Si el agua de enfriamiento ingresa al condensador a 28 grados y sale a 48 grados centígrados con un calor latente de 570.3 kcal.

Tendremos que para evaporar 1kg de agua de enfriamiento se requerirán:

$$=(48-28) + 570.3$$

$$= 590.3 \text{ kcal.}$$

Suministrado por $590.3 / 551.69 = 1.07 \text{kg}$ de descarga de la turbina.

En consecuencia habría una ganancia de masa de 7% en el agua de enfriamiento circulada.

5.4.3 SELECCIÓN Y MATERIALES.

Tabla 5.10 Selección de la torre de enfriamiento

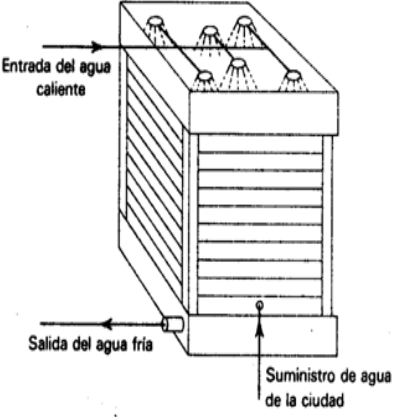
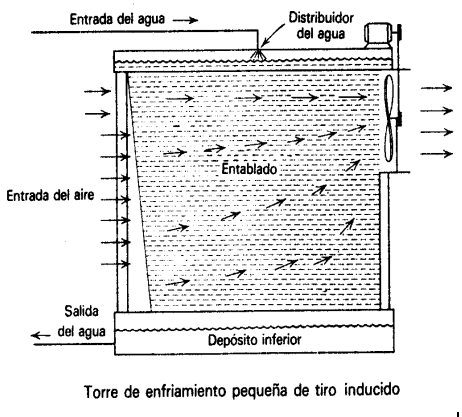
Característica	Torres de tiro natural	Torres de tiro forzado
Esquema		
Forma	Su forma es de una tobera convergente-divergente, con el motivo de mejorar la circulación natural.	Su forma es de igual manera que las de tiro natural. Pueden clasificarse en torres de tiro inducido y tiro forzado.
Funcionamiento	En algunos casos se ponen ventiladores en la salida de la torre para solamente activar la circulación natural.	Circulación de aire se necesita la utilización de ventiladores, los mismos que llevan al aire a circular por el interior de la torre de refrigeración.
Capacidad	La capacidad de una torre de tiro natural varía con la velocidad del viento, no siempre es constante.	La capacidad de las torres de tiro mecánico por unidad de tamaño físico es considerablemente mayor.
Ubicación	Deberán siempre estar localizadas fuera del local en lugares donde el viento puede soplar libremente a través de la torre.	En cual quiera que sea el lugar.
Eficiencia	Las estructuras adyacentes o los obstáculos naturales pueden desviar la brisa de la torre. O bien, un viento un poco fuerte puede ocasionar el arrastre de una cantidad anormal de agua desde la torre de tiro natural en forma de "brisado".	Tienen una especie de entablado para mejorar su eficiencia. Se pueden usar eliminadores de roció para evitar pérdidas excesivas por arrastre.

Tabla 5.10 Selección de la torre de enfriamiento (Continuación)

Tamaño	Debido al inmenso tamaño de estas torres (500 pie alto y 400 pie de diámetro), se utilizan por lo general para flujos de agua por encima de 200000 gpm.	Son más pequeñas que las de tiro natural.
Utilización	Son ampliamente utilizadas en las centrales térmicas.	Son las más usadas en geotermia ya que no requieren de grandes cantidades de agua de reposición.

En las torres a contracorriente, el grado de enfriamiento es proporcional a su altura, pero claro está, un incremento de esta hace necesario el uso de ventiladores más potentes para lograr que el aire venza las resistencias que se oponen a su movimiento, apareciendo además de inconvenientes hidrodinámicos, problemas constructivos que obligan a establecer valores límites de altura según sea el tipo de torre que se diseñe.

Limitaciones de las torres de enfriamiento

El agua que se enfría por aspersion en el aire no se puede enfriar a menos de la temperatura de bulbo húmedo del aire. Por tanto, la temperatura de condensación a la cual funcionará el sistema se debe mantener un poco más alta que la temperatura de bulbo húmedo del aire. Las torres de enfriamiento de alta eficiencia, de tiro forzado o inducido, enfriarán el agua condensada a un punto con una diferencia de entre 5 y 8°F de la temperatura de bulbo húmedo prevaleciente. Las torres de tiro natural rara vez llegan a acercarse más de 10 o 12°F a la temperatura de bulbo húmedo del aire. Por ello, al seleccionar una torre de enfriamiento, es conveniente aumentar en 5% la temperatura de bulbo húmedo "de diseño".

Todos los condensador para centrales geotérmicas usan una torre de enfriamiento seca, la cual es alimentada por el mismo fluido del condensador que se va

enfriando; este sistema evita que se utilice grandes cantidades de agua fresca de ríos y contamina menos que un sistema con refrigeración directa del río.

Materiales para la construcción del sistema

Generalmente están constituidas con diversos materiales como la madera, plásticos, etc. formando estructuras de puentes múltiples, también se emplean estructuras de aluminio, ladrillo, concreto o asbesto.

Con frecuencia, el armazón y el empaque interno de estos equipos son de pino, material muy durable cuando se tiene contacto continuo con agua.

Tabla 5.11 Principales materiales utilizados en las torres de enfriamiento.

DESCRIPCION	MATERIAL
Paredes	Aluminio, ladrillo, concreto o asbesto.
Estructura	Acero A36
Ventilador	Plástico, aluminio o acero.
Motor eléctrico	Fundición para la carcasa, cobre para
Tuberías	Acero, concreto; dependiendo de la característica del fluido.
Mallado	Madera, plásticos, polipropileno, moldeado en forma de enrejado o alguna otra forma.
Cables para conexión	Plástico

Fuente: ver referencias [31-33, Artículo de investigación “Torre de enfriamiento de tiro forzado” de la Universidad Nacional de Córdoba, Departamento de aeronáutica.

Artículo de investigación, “Diseño de una torre de enfriamiento para un turbo-generado”, Universidad San Carlos- Guatemala, facultada de Ing. Mecánica]

Tabla 5.12 de los plásticos para ser usados en torres de enfriamiento

Ventajas de los Plásticos.	Desventajas de los Plásticos.	Temperatura de operación.
El viento es inerte en rangos de condiciones de operación.	No se humedecen fácilmente.	P.V.C. 115 °F
Algunos plásticos semejantes al pvc tienen bajo riesgo de incendiarse como la madera seca.	Algunos plásticos no deben estar en contacto con aceite o aceite en soluciones.	Poliestireno 115 °F Polipropileno 115 °F
No son un soporte natural de las algas.	Algunos son riesgosos con el fuego como el poliestireno.	Poliestireno de alta densidad 115 ° F

Fuente: Ver referencia [34]

5.4.4 VIDA ÚTIL.

Cuando un sistema es cerrado, el agua no entra en contacto con el aire de fuera. Como consecuencia la contaminación del agua de las torres de enfriamiento por los contaminantes del aire y microorganismos es insignificante. Además, los microorganismos presentes en las torres de enfriamiento no son eliminados a la atmósfera.

Ideas para alargar la vida útil de las torres de enfriamiento:

- Los flotadores y válvulas flotantes del conjunto de torres de enfriamiento deben desmontarse, limpiarse, y volverse a lavar.
- Deben lavarse el interior de la torre de enfriamiento y los tableros o empaques de la torre.
- Los paneles perforados y las boquillas de rociado deben limpiarse a fondo.
- Toda tubería de agua de condensación que no esté sujeta a congelación debe dejarse llena con agua tratada para evitar la corrosión.
- Las válvulas de llenado automático deben dejarse cerradas con seguro.
- Las coladeras y mallas deben ser removidas y limpiadas.

- Los ventiladores de las torres y los impulsores de los ventiladores deben ser cuidadosamente inspeccionados para detectar desgaste, agrietamiento, corrosión, y otras condiciones que pueden causar interrupciones del servicio.
- De ser posible, las aperturas de los ventiladores y persianas deben ser cubiertas o protegidas para minimizar la cantidad de suciedad aerotransportada que llega a la torre o al condensador de evaporación durante el período invernal ocioso.
- Las bombas deben ser preparadas para el invierno usando lubricante espumoso, y los rodamientos del motor de la bomba deben ser revisados y lubricados.

5.5 TUBERÍAS

5.5.1 ANÁLISIS DE PÉRDIDAS.

Los cálculos numéricos de las pérdidas de temperatura como de presión en el esquema final se los puede ver en el anexo 2. En esta sección se muestra las formulas a utilizar para estimar los rangos de perdidas tanto de presión como de temperatura.

5.5.1.1 Caídas de temperaturas:

De acuerdo a la experiencia en las distintas centrales geotérmicas se han sacado unos rangos de las pérdidas en las tuberías así tenemos:

Tabla 5.13 tabla con los valores aproximados de los rangos de pérdidas de temperatura en una tuberías aislada y o aislada

Tubería	Tipo	Rango de perdidas °C/km
1	No aislada	2-5
2	Aislada	0.1-1

Fuente: H. Christopher y H. Amstead, " Geothermal Energy", Capitulo 9, pág. 209 [1]

Las pérdidas de calor en las tuberías se producen por la disipación de calor de las mismas hacia el ambiente, y se lo puede calcular en función de la longitud, y las características propias del fluido y la tubería como del aislante térmico si se usarán (recomendado).

Usando las formulas de la base de transferencia de calor en una tubería por conducción y convección tenemos la siguiente expresión para determinar la disipación de calor:

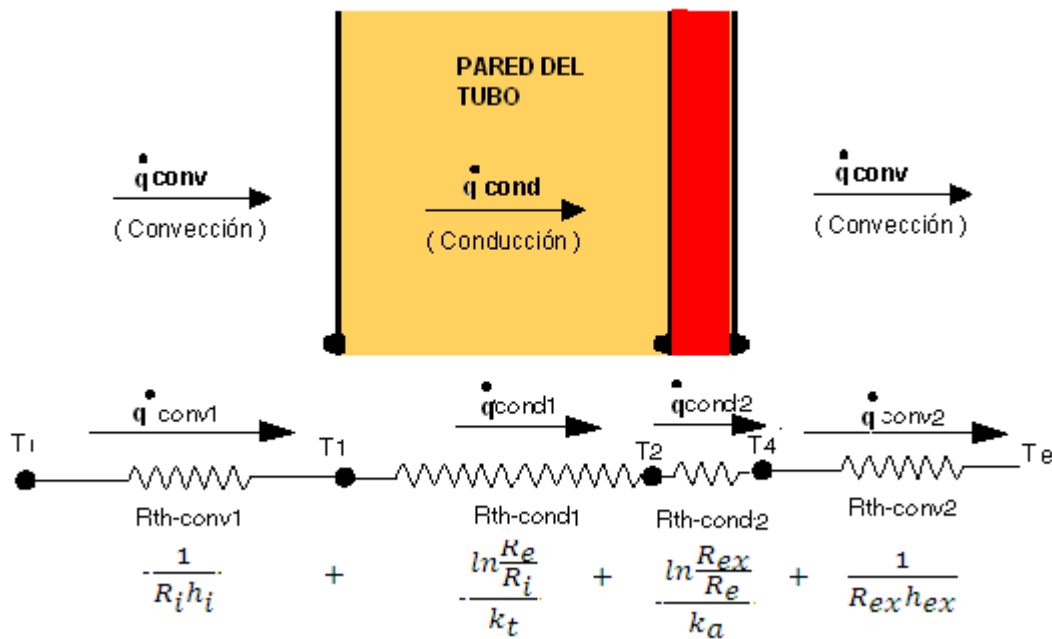


Figura 5.18, Esquema de la analogía eléctrica de la transferencia de calor en un tubo con aislamiento térmico mediante la convección y conducción.

$$q = \frac{2\pi}{f_i + \frac{1}{R_i h_i} + \frac{\ln \frac{R_e}{R_i}}{k_t} + \frac{\ln \frac{R_{ex}}{R_e}}{k_a} + \frac{1}{R_{ex} h_{ex}}} (T_{in} - T_{ex}) \quad (24)$$

q, Potencia térmica disipada por unidad de longitud de tubería (W/m).

f_i, Es el factor de ensuciamiento de la superficie interior de la tubería (m/W).

²⁴ Todas las formulas han sido recopiladas y usadas de la misma fuente para evitar confusiones con la nomenclatura, más detalle de las mismas referencia [2, 10]

R_i , Es el radio interior de la tubería (m).

R_e , Es el radio exterior de la tubería (m).

R_{ex} , Es el radio exterior de la tubería más aislante (m).

h_i , Es el coeficiente de convección de la superficie interior ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$).

h_{ex} , Es el coeficiente de transmisión de la superficie exterior ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$).

k_t , Es el coeficiente de conducción del material de la pared de la tubería ($W/m \text{ } ^\circ C$).

k_a , Es el coeficiente de conducción del aislante térmico ($W/m \text{ } ^\circ C$).

T_{in} , Es la temperatura del agua en el interior de la tubería ($^\circ C$).

T_{ex} , Es la temperatura del exterior ($^\circ C$).

Si la tubería no tiene aislamiento el factor R_{ex} donde se incluya valores del aislamiento se lo elimina de la formula general.

5.5.1.2 Caídas de Presión

Este es un efecto directo en el transporte de fluidos por tubería, esto se da por que la presión con la ingresa a la tubería es diferente a la de la salida ya que se va perdiendo a lo largo de la misma y el volumen del fluido aumenta; es por ello que en tramos cortos se deben restituir la presión; en tuberías con acoples, curvas, desvíos, modificaciones y demás, la caída de presión es mayor que una completamente recta y para esto hay manuales que permite el cálculo del mismo. La formula general de aproximación es:

Para tubería con vapor:

Para tuberías con líquido:

Para caídas con altura

$$\Delta P_f = 0.8 \frac{L \dot{m}^{1.85}}{\rho D^{4.97}} \quad \Delta P_f = 1.75 \times 10^{-4} \frac{f L \dot{m}^2}{\rho D^5} \quad \Delta P_g = \rho g \Delta H \quad (25)$$

²⁵ Del libro especializado en geotermia y análisis de centrales geotérmicas por Ronal Dipippo : ver referencia [6]

$$f = \frac{0.25}{\left\{ \log_{10} \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right] \right\}^2} \quad \text{Re} = \frac{4}{\pi} \frac{\dot{m}}{\mu D}$$

ΔP_f Perdida de presión por rozamiento (Psi)

L, longitud del tramo (ft),

m , es el flujo que circula (lbf/h),

ρ' , es la densidad del fluido (lbm/ft³),

D, es el diámetro interno de la tubería (in).

La caída de presión estará dada en lbf/in².

Los factores de 0.8 y 1.75×10^{-4} es de acuerdo a las unidades usadas

f , es el facto de fricción dado por Swamee-Jain

ε , es la rugosidad interna. (ft)

Re es el número de Reynolds.

μ , es la viscosidad absoluta (lbm/ft s)

ΔH , es la diferencia de alturas (ft)

ΔP_g , es la caída de presión por diferencia de alturas. (Psi)

5.5.2 SELECCIÓN Y MATERIALES.

El diseño de un sistema de tuberías consiste en el diseño de sus tuberías, brida y su tortillería, empacaduras, válvulas, accesorios, filtros, trampas de vapor juntas de expansión. También incluye el diseño de los elementos de soporte, tales como zapatas, resortes y colgantes, pero no incluye el de estructuras para fijar los soportes, tales como fundaciones, armaduras o pórticos de acero.

Aun en el caso en que los soportes sean diseñados por un ingeniero estructural, el diseñador mecánico de la tubería debe conocer el diseño de los mismos, por la interacción directa entre tuberías y soportes.

El dimensionamiento de cada una de las tuberías que transporta al fluido de un pozo a una central geotérmica depende de:

- Producción del pozo.
- Caída de temperatura.
- Caída de presión a lo largo de la tubería.

Para que las tuberías trabajen de una forma segura se deben hacer anclajes fijos en tramos mínimos de 100m ubicados en el terreno para prevenir la dilatación y la contracción térmica entre dichos puntos de anclaje usando:

- Tuberías en zigzag
 - Se las construye en tuberías horizontales.
- Tuberías con omegas verticales
 - Acceso para caminos.
 - Absorben por lo menos 0.75 m de movimiento de la tubería.
 - Ejemplo en Wairakei, están espaciadas cada 300m. El alto costo de su construcción se ve compensado por la ligereza y el amplio espacio de las anclas.

De cualquiera que sea la forma de contrarrestar la dilatación, es común tomar la mitad del movimiento de dilatación de la tubería para el diseño del sistema en frío, con lo cual los esfuerzos iniciales sean parecidos pero al inverso a los esfuerzos finales de la tubería en caliente.

Un gran problema en la conducción de agua calientes es que si está a una temperatura muy elevada, el fluido se vuelve de carácter explosivo, porque el agua comienza a hervir produciendo bolsas de vapor que originan a su vez esfuerzos muy grandes hasta el punto de romper las tuberías. Por esta razón el conducir agua caliente presurizada no siempre es una buena idea y se la debe tratar con mucho cuidado. Para controlar esto se usan puntos de presión hidráulica donde esta es mayor a la del vapor.

Espesor de pared:

Los cálculos numéricos para las tuberías del esquema final se los puede ver en el anexo 2. En esta sección solo se muestra la fórmula con su respectiva utilización.

El código referente es el ASME B31.1 para tubería de conducción de fluidos calientes de potencia. Según este código para encontrar el espesor de pared requerido en la tubería se seguirá la siguiente ecuación:

Si usamos diámetro exterior:

$$t = \frac{PD_0}{2(SE+Py)} + A \quad (26)$$

Si usamos diámetro interior:

$$t = \frac{Pd_i + 2SE + 2yPA}{2(SE + Py - P)}$$

Donde:

t es el mínimo espesor requerido de pared.

P, es la presión de diseño.

S, es el esfuerzo máximo generado por la presión interna el tubo.

E, es el factor de eficiencia en la soldadura.

y, es un coeficiente que representa la composición química en los materiales.

Do, es el diámetro exterior del tubo.

Di, es el diámetro interior del tubo.

A, es la cantidad de adición de material por efectos de la corrosión y erosión dentro de las tuberías.

Sistema de transporte:

En el tendido de las tuberías de transporte de agua caliente, vapor o mezcla en grandes distancias se puede adoptar las siguientes opciones:

- Tubería al aire con aislamiento térmico y cubierta protectora metálica.
- Tubería aislada térmicamente y encajonada dentro de una zanja o canal de conducción de obra.
- Tubería aislada y enterrada.

²⁶ Todas formulas para el espesor de pared son usadas según el código ASME B31.1 referirse al código.

- Tubería sobre una base de grava y cubierta protectora de tierra.

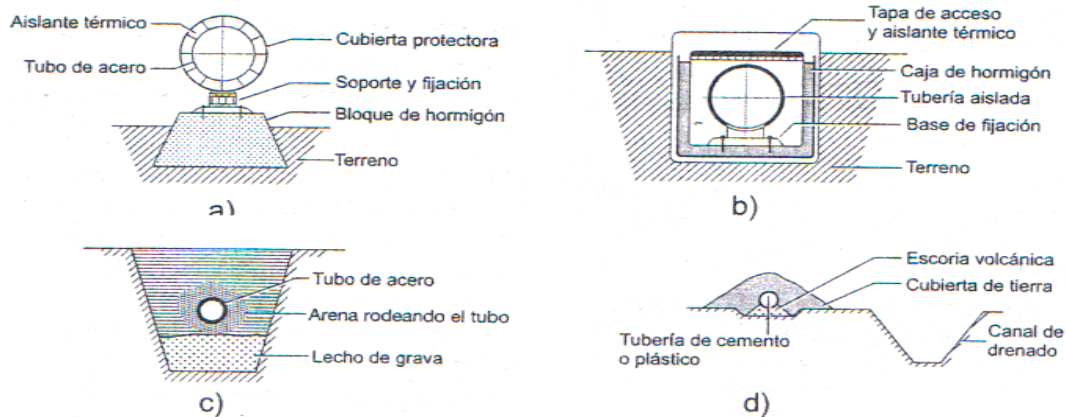


Figura 5.19, ejemplo de instalación de tuberías para geotermia, a) Tubería al aire con aislamiento térmico y cubierta protectora metálica. b) Tubería aislada térmicamente y encajonada dentro de una zanja o canal de conducción de obra. c) Tubería aislada y enterrada. d) Tubería sobre una base de grava y cubierta protectora de tierra.

Velocidad óptima de circulación:

En cuanto a la velocidad de circulación del fluido se debe seleccionar una tubería cuya proporcione un coste integral unitario mínimo:

Coste del ducto; el diámetro de la tubería es un función inversamente proporcional a la velocidad, es decir mientras mayor sea el diámetro de la tubería más lento pasará el fluido. Por consiguiente el cote del conducto y su instalación decrecerá al aumentar la velocidad.

Coste energético; Las pérdidas de carga por acción del rozamiento del fluido en el interior de la tubería está en función del cuadrado de la velocidad de circulación y la potencia de la bomba es una función de caudal de la presión suministrada. Por lo cual cuando se quiere transportar una cantidad determinada de agua, a medida que se aumente la velocidad, se incrementara la potencia de la bomba y en consecuencia el gasto energético por metro cubico de agua transportada.

Coste total; este es la suma entre dos funciones, la primera creciente y la segunda decreciente, se encontrara un costo mínimo, esto es la velocidad optima para la circulación del fluido. De manera práctica se aconseja velocidades óptimas entre: 1 y 3 m/s en fluidos geotérmicos.

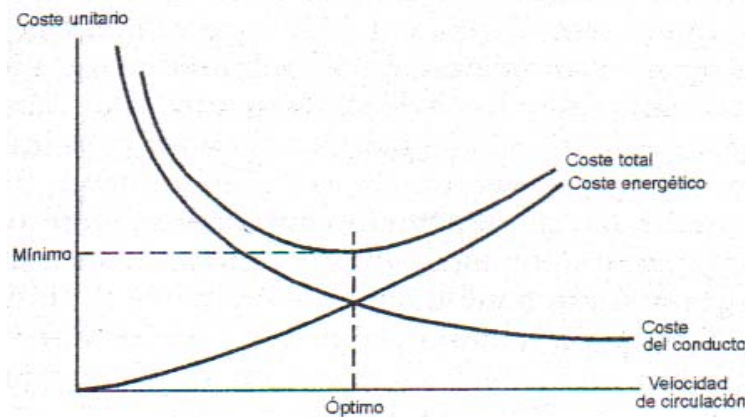


Figura 5.20 representación ilustrada del coste de la conducción de agua caliente en función de la velocidad de circulación del agua.

Materiales.

Hay una diversidad de materiales con los cuales se fabrican las tuberías para la transportación de agua caliente o vapor de agua como son:

Tabla 5.14 tabla comparativa de los diferentes materiales usados en tuberías para la geotermia.

Material	Ventaja	Desventaja	Disponibilidad
Acero al carbono	<p>Único material con resistencia a temperaturas muy elevadas</p> <p>Para geotermia no tiene limitaciones.</p>	<p>El grado de corrosión en el interior como en el exterior de la tubería es muy elevado.</p> <p>A causa de la dilatación en tramos muy largos se deben instalar puntos de anclaje (cada 100m)</p>	<p>Diámetros desde: 0.25"-72"</p> <p>Temperaturas elevadas como 370°C.</p>

Tabla 5.14 tabla comparativa de los diferentes materiales usados en tuberías para la geotermia. (Continuación)

Acero galvanizado	La capa de zinc tiene gran resistencia al ataque químico del agua termal.	Al reducirse la capa protectora de zinc, se generan células galvánicas hierro-zinc provocando erosión localizada y descascarillado progresivo.	Efectividad hasta los 57°C. Amplia gama de tamaños.
Acero dúctil	Alta resistencia Buena flexibilidad. Facilidad de mecanizado. Buen comportamiento frente a la corrosión. (la pérdida de espesor es mucho menor que al carbono)	Su costo es mucho mayor que el acero al carbono.	Diámetros desde: 0.25"-72" Temperaturas elevadas como 370°C.
Fibra de vidrio	Mayor coeficiente de dilatación en relación al del acero	Se deben utilizar con resinas como epoxi. Mayores fugas. No se aconseja para transportar agua caliente cercana al punto de saturación, desprendimientos de la tubería.	Trabajan hasta 150°C En tamaños > 2"
Cloruro de polivinilo (Termoplástico rígido)	Es el segundo material más utilizado. Ideal para sistemas de desagüe e instalaciones de Lampistería.	Para bajas temperaturas	Máximo 60°C Tamaños entre: 0.5"-20"

Tabla 5.14 tabla comparativa de los diferentes materiales usados en tuberías para la geotermia. (Continuación)

Poliétileno	Tuberías flexibles.	Temperatura bajas	máxima de trabajo 60-65°C y con alta densidad hasta 80°C Diámetros: 0.5"-42"
Poliétileno reticulado	Plástico de alta densidad. Ideal para suelos radiantes.	Temperatura bajas	Temperaturas 82°C Presión absoluta 6.8 bar Diámetro hasta 4"

El científico Pollastri realizó un análisis excelente sobre los problemas en la construcción de tuberías y sobre los esfuerzos que ocurren por medio de los cambios de temperatura sobre ella, así, el acero dulce, que a parte de ser un material barato en relación a los otros usados en tuberías, es también el más adecuado para las tuberías y los recipientes sujetos a presión cargados con fluidos geotérmicos. Esto es debido a:

- La inmunidad al ataque de ácido sulfhídrico H₂S en ausencia de oxígeno.
- Facilidad de mecanizado y a demás porque se rebajan los costos de hacer tubos sin costura pero si se los usará con dicho material es más fácil y económico por sus propiedades.
- Cualquier tipo de soldadura que se realiza en los tubos de cualquier material deberá cumplir con las normas AWS.

Los más usados son:

- ASTM A106, Gr B
- ASTM A335, Gr P11 or P22

5.5.3 ACOPLES Y ACCESORIOS

5.5.3.1 Anclajes

- móviles o fijos
- se los utiliza a lo largo de la tubería y especialmente cuando hay quiebres en zigzag o de lira,
- Sirve para instalar los múltiples, las uniones de los ramales por la nulidad de movimiento en este punto.

5.5.3.2 Soportes

- En longitudes rectas de tubería soportadas por rodillos instalados sobre las planchas de concreto sentadas en el terreno.
- Para las omegas se usan marcos ligeros de acero.
- Para los anclajes se usan estructuras metálicas de acero de alta resistencia.
- Si es necesario o se requiere de un mejor soporte en tramos de tubería largos, se instala soportes intermedios con guías de acero laterales o superiores para evitar el pandeo de los tubos bajo los esfuerzos diarios.

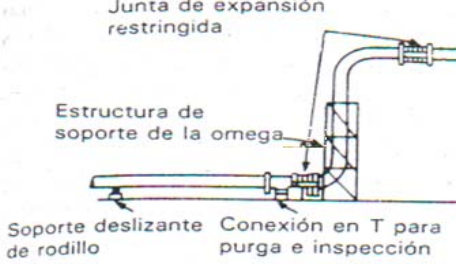
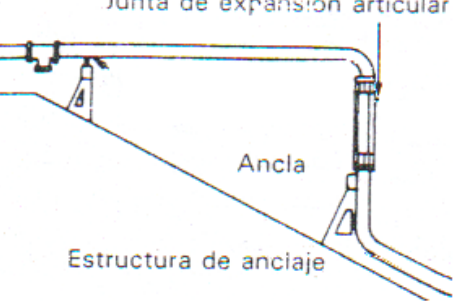
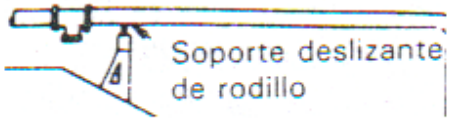
5.5.3.3 Juntas de expansión

Sirve como ya se menciona antes para compensar la dilatación y contracción térmica de las tuberías, así témenos:

Tabla 5.15 tabla comparativa de las diferentes juntas usadas en las instalaciones de transporte de agua caliente y vapor de una central geotérmica

Tipo	Característica	Uso	Grafico
Axiales	Granes fuerzas de compresión o de tensión a las anclas	Son usadas en los cabezales de los pozos.	<p>El diagrama ilustra una tubería con una junta de expansión axial. A la izquierda, la tubería está anclada a un punto etiquetado como 'Ancla'. A la derecha, la tubería se conecta a una 'Carretera' (carriage) que también está anclada a un punto etiquetado como 'Ancla'. La junta de expansión axial está ubicada entre los dos puntos de anclaje, permitiendo el movimiento axial de la tubería.</p>

Tabla 5.15 tabla comparativa de las diferentes juntas usadas en las instalaciones de transporte de agua caliente y vapor de una central geotérmica (Continuación)

<p>Restringidas</p>	<p>Soportan flexiones angulares sin que haya cedencia axial neta.</p>	<p>En omegas de tres pernos de articulación, con empujes axiales mininos. En cambios de dirección de la tubería.</p>	
<p>Articuladas</p>	<p>Poseen corrugaciones flexibles y con bridas en el extremo, con lo cual se permite que flexione la tubería a los lados entre bridas con lo cual absorben complicados movimientos.</p>	<p>En tramos de tubería relativamente largos. Cuando se atraviesa un cerro, pendiente abajo, etc.</p>	
<p>Deslizantes</p>	<p>Extremadamente simples Son vulnerables a los depósitos químicos y requieren mucho mantenimiento.</p>	<p>No siempre se las usa, por sus problemas pero en cuestiones de rápida solución son eficaces.</p>	

Fuente: Ver la referencia [1]

5.5.3.4 Múltiple

Para aumentar la capacidad de producción en una central al usar mas tuberías es importante usar una un múltiple con válvulas para poderlas aislar y hacerlas trabajar por separada.

5.5.3.5 Codos

Se utilizan para cambiar la dirección del flujo de las líneas tantos grados como lo especifiquen los planos o dibujos de tuberías. Los codos estándar son aquellos que vienen listos para la pre-fabricación de piezas de tuberías y que son fundidos en una sola pieza con características específicas y son:

- Codos estándar de 45°
- Codos estándar de 90°
- Codos estándar de 180°

Sus características son:

- Diámetro. Es el tamaño o medida del orificio del codo entre sus paredes los cuales existen desde ¼" hasta 120" .También existen codos de reducción.
- Angulo. Es la existente entre ambos extremos del codo y sus grados dependen del giro o desplazamiento que requiera la línea.
- Radio. Es la dimensión que va desde el vértice hacia uno de sus arcos. Según sus radios los codos pueden ser: radio corto, largo, de retorno y extra largo.
- Aleación. Es el tipo de material o mezcla de materiales con el cual se elabora el codo, entre los más importantes se encuentran: acero al carbono, acero a % de cromo, acero inoxidable, galvanizado, etc
- Junta. Es el procedimiento que se emplea para pegar un codo con un tubo, u otro accesorio y esta puede ser: soldable a tope, roscable, embutible y soldable.

5.5.3.6 Purgas

Cuando hablamos de vapor saturado que está siendo transportado por tubería se pierde calor, se llega a condensar, el autor del libro "Energía Geotérmica" explica que no se debe tener una condensación mayor al 5 o 7% y que esta no es mala, sino, que ayuda a limpiar la tubería, pero eso si hay que quitar este condensado de las tuberías para eso se usan las purgas en forma de T donde se acumula el condensado para ser retirado. También hay partículas como sulfatos en el vapor que al condensarse son arrastrados con el mismo con lo cual queda una tubería libre de impurezas capaces de dañar el interior de esta. La purgas se colocan cada 150 m y se puede usar también como sistema de lavado de tuberías gracias a la condensación del vapor.

5.5.3.7 Tés

Se fabrican de diferentes tipos de materiales, aleaciones, diámetros. Pueden ser de varios tipos:

- Diámetros iguales.
- Te de recta.
- Reductora con dos orificios de igual diámetro.
- Reductora con dos orificios pero uno desigual.

Sus características de selección son:

- Diámetro. Las té existen en diámetros desde 1/4" " hasta 72" " en el tipo Fabricación. Espesor. Este factor depende del espesor del tubo o accesorio a la cual va instalada y ellos existen desde el espesor fabricación hasta el doble extra pesado.
- Aleación. Las más usadas en la fabricación son: acero al carbono, acero inoxidable, galvanizado, etc.
- Juntas. Para instalar las te en líneas de tubería se puede hacer, mediante procedimiento de rosca embutible-soldable o soldable a tope.
- Dimensión. Es la medida del centro a cualquiera de las bocas de la te.

5.5.3.8 Reductores; son accesorios de forma cónica, fabricadas de diversos materiales y aleaciones. Se utilizan para disminuir el volumen del fluido a través de las líneas de tuberías.

5.5.3.9 Empacaduras; es un accesorio utilizado para realizar sellados en juntas mecanizadas existentes en líneas de servicio o plantas en proceso. De la amplia gama de empacaduras no todas se pueden usar debido a la alta temperatura que se tiene en el fluido geotérmico de Chachimbiro, así tenemos:

Tabla 5.16 Selección de empacaduras

Empacadura	Característica	Se usa
Empacadura flexitalica.	De metal y de asientos espirometatos cuso con cualquier tipo de fluido	si
Anillos de acero.	En líneas de aceite de alta temperatura y en líneas de amoniaco.	no
Empacadura de asbesto.	De asbesto simple tipo de anillo para bridas de cara alzada o levantada donde las temperaturas y presiones sean bajas.	Tal vez
Empacaduras de cartón	En cajas de condensadores, donde la temperatura y la presión sean bajas	no
Empacaduras de goma	En bridas machos y hembras que estén en servicio con amoniaco o enfriamiento de cera	no
Empacadura completa	En uniones con brida plana de algunos enfriadores y condensadores.	Tal vez
Empacadura de metal	En acero al carbono, según ASTM, A-307, A-193. en aleaciones de acero inoxidable, A-193. También son fabricadas según las normas AISI en aleaciones de acero inoxidable A-304, A-316.	si

Tabla 5.16 Selección de empaaduras (Continuación)

Empaaduras grafitadas.	Gran resistencia al calor (altas temperaturas) se fabrican tipo anillo y espiro metálicas de acero con asiento grafitado, son de gran utilidad en juntas bridadas con fluido de vapor.	La más usadas
------------------------	--	---------------

5.5.3.10 Bridas; son accesorios para conectar tuberías con equipos (Bombas, intercambiadores de calor, calderas, tanques, etc.) o accesorios (codos, válvulas, etc.). La unión se hace por medio de dos bridas, en la cual una de ellas pertenece a la tubería y la otra al equipo o accesorio a ser conectado.

La ventaja de las uniones bridadas radica en el hecho de que por estar unidas por espárragos, permite el rápido montaje y desmontaje a objeto de realizar reparaciones. El material más usado es AISI 403.

Tabla 5.17 Selección de Bridas

Bridas	Característica	Se usa
Brida con cuello para soldar	Minimizar el numero de soldaduras en pequeñas piezas	No
Brida con boquilla y de cuello largo para soldar.	Permite una mejor soldadura.	si
Brida deslizante	tiene la propiedad de deslizarse hacia cualquier extremo del tubo antes de ser soldada	si
Brida roscada	Instaladas sin necesidad de soldadura y se utilizan en líneas con fluidos con temperaturas moderadas, baja presión y poca corrosión	no

Tabla 5.17 Selección de Bridas (Continuación)

Brida loca con tubo rebordeado	Su borde puede girar alrededor de cuello, lo que permite instalar los orificios para tornillos en cualquier posición sin necesidad de nivelarlos.	si
Brida ciega	completamente sólida sin orificio para fluido, y se une a las tuberías mediante el uso de tornillos	si
Brida orificio	Para cumplir su función como bridas de orificio, del grupo de las denominadas estándar, específicamente del tipo cuello soldable y deslizantes	No
Brida embutible	Tiene la propiedad de ser embutida hasta un tope interno que ella posee, con una tolerancia de separación de 1/8" y solo va soldada por el lado externo.	no
Brida de reducción	Reduce el diámetro de las tuberías	si

5.5.3.11 Disco ciego

Son accesorios que se utilizan en las juntas de tuberías entre bridas para bloquear fluidos en las líneas o equipos con un fin determinado.

Los discos ciegos existen en diferentes formas y tamaños, los más comunes son:

- Un plato circular con lengua o mango.
- Bridas terminales o sólidas.

5.5.3.12 Válvulas

Se utiliza para regular y controlar el fluido de una tubería. Este proceso puede ser desde cero (válvula totalmente cerrada), hasta de flujo (válvula totalmente abierta), y pasa por todas las posiciones intermedias, entre estos dos extremos.

Tabla 5.18 Selección de Válvulas.

Válvulas	Característica	Se usa
Válvula de tres vías	Para mezclar fluidos, o bien para derivar un flujo de entrada dos de salida.	si
Válvula de Globo	de simple asiento, de doble asiento y de obturador equilibrado respectivamente	No
Válvula de Compuerta.	Efectúa su cierre con un disco vertical plano o de forma especial.	Si
Válvula en Y	Válvula de cierre y de control. Como válvula todo-nada se caracteriza por su baja pérdida de carga.	Si
Válvula de retención	No permite el paso del fluido hasta que llegue a una cierta presión	Si
Válvula de Mariposa.	Formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular.	Si
Válvula de Bola.	Tiene una cavidad interna esférica que alberga un obturador en forma de bola o esfera.	Si
Válvula anti retorno	Solo permite el paso del fluido en un solo sentido	Si
Válvula de Orificio Ajustable.	Consiste en una camisa de forma cilíndrica que esta perforada con dos orificios, uno de entrada y otro de salida y que gira mediante una palanca exterior accionada manualmente o por medio de un servomotor.	Si

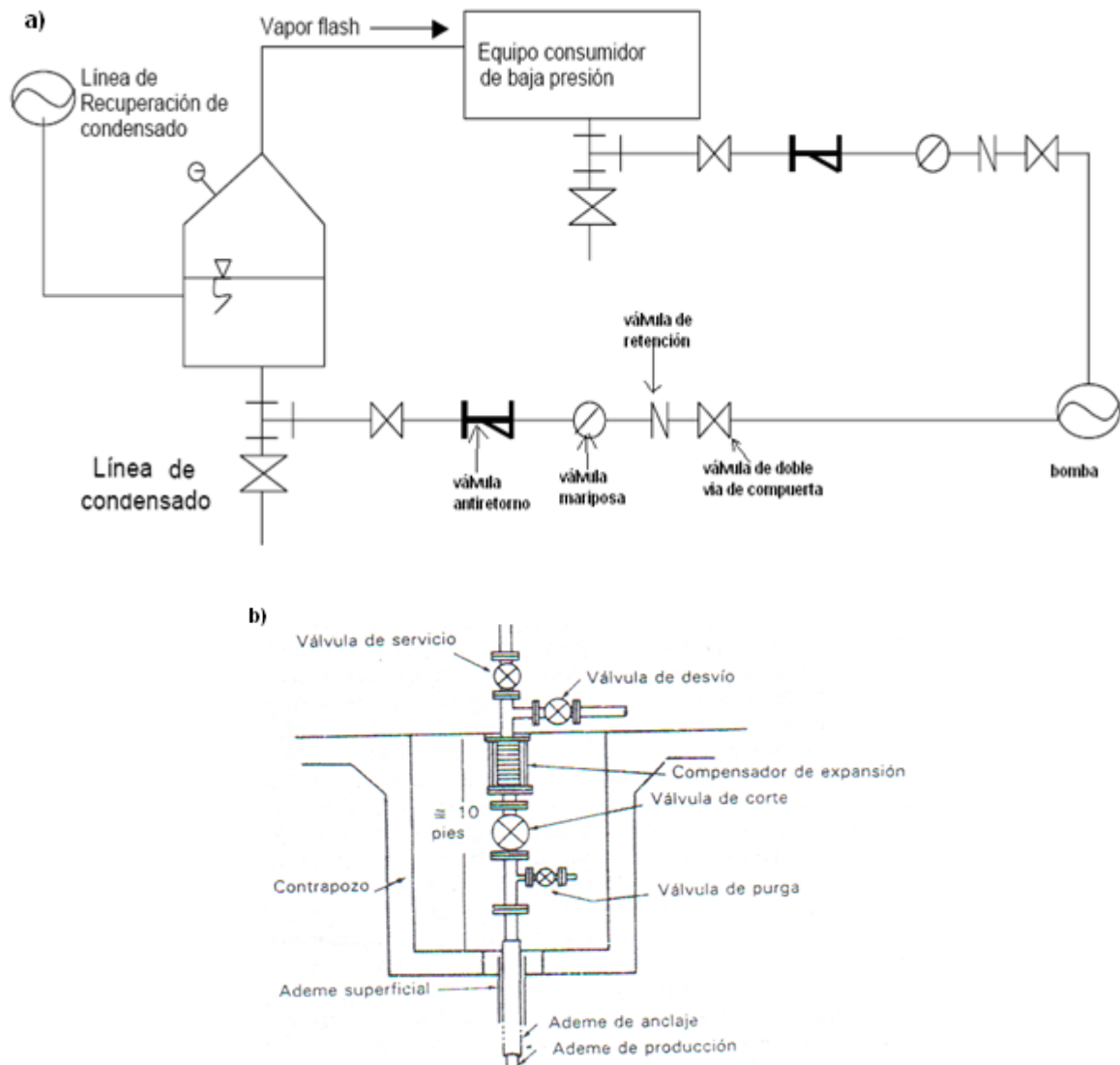


Figura 5.21 a) representación esquemática de las válvulas que se usan en una línea de vapor b) Disposición de válvulas del cabezal de pozo en Nueva Zelanda.[para el b) [2]]

Además de las válvulas que se presenta en la figura como la válvula de doble compuerta para permitir el paso de vapor de una línea a otra; la válvula anti retorno para dejar pasar en un sentido el vapor pero el mismo no se pueda regresar y causar daños; la válvula mariposa que permite regular el caudal del flujo de vapor y la válvula de retención, que como dice su nombre sostiene, retiene el flujo de vapor antes de pasar por la ella; se ponen válvulas de seguridad de alta presión y de alivio (mayor detalle en el capítulo 7 sección 3).

El tipo de válvula puede variar según el sistema de seguridad que se tenga, esto es si es computarizado, semi-computarizado o manual. Seleccionar las válvulas de seguridad, no tanto por el diámetro sino por la presión de apertura (Lbs/hora), por lo menos 10% más sobre la presión de generación.

Los materiales más usados son: ASTM A216 or A217.

5.6 OTROS ELEMENTOS

5.6.1 PARA GASES NO CONDENSABLES

Tabla 5.19 Selección del equipo para tratar los gases no condensables

Característica	Extractor de gases	Eyectores
Utilidad	X	x
Mayor capacidad		x
Costo inicial bajo		x
Mantenimiento		x
Menos Complejos		x
Menor consumo interno	X	
Versatilidad		x

Cuadro comparativo de ventajas entre los sistemas de extracción de gases no condensables.

En los dos casos tanto el eyector como el extractor sirven para generar el vacío y extraer los gases no condensables del fluido.

La diferencia como vemos en el cuadro comparativo anterior es que:

Los extractores en comparación con los eyectores estos son más económicos en cuanto a consumo de energía. Pero el mantenimiento es mucho más costoso y necesario que los eyectores ya que estos no tienen partes móviles.

Los eyectores tienen una mayor capacidad que los extractores ya que pueden alcanzar presiones absolutas de entre 1 micrón y 30 pulgadas de Hg.

En cuanto a la versatilidad los eyectores se los puede tener en varios tamaños, tipos y materiales como:

- Activados por vapor, son más baratos y no requieren de grandes cantidades vapor comparado con los de agua.
- Activados por agua, estos son más eficientes que los de vapor por en estos no intervienen las pérdidas de calor latente.

Factores de selección: Hay siete factores que deben ser considerados para seleccionar correctamente un sistema de eyectores:

1. Presión/Temperatura de succión en la brida de aspiración del eyector.
2. Presión de descarga requerida.
3. Naturaleza de la carga (composición, vapores corrosivos, etc.).
4. Capacidad requerida.
5. Mínima presión de vapor disponible para el sistema eyector.
6. Máxima temperatura del agua de entrada a condensadores (si se requieren).
7. Tipo de condensador requerido: barométrico o de superficie.

La cantidad de vapor requerida para operar un eyector se incrementa proporcionalmente con la relación de compresión requerida, hecho que limita los eyectores de simple etapa.

El método más eficiente de operación es utilizar eyectores en varias etapas con condensadores intermedios para condensar (es decir, para sacar) el vapor de la etapa anterior. De esta manera, sólo los no condensables pasan a la siguiente etapa y la cantidad de vapor requerida se reduce considerablemente.

Tabla 5.20 Se muestra una orientativa de selección del eyector:

Presión de succión	Nº de etapas de eyectores requeridas
3”Hg.Abs. o superiores	Simple etapa
12.7 mm.Hg.Abs. a 3”Hg.Abs.	Dos etapas
1 mm.Hg.Abs a 12.7 mm.Hg.Abs.	Tres etapas
250 micrones a 5 mm.Hg.Abs	Cuatro etapas
50 micrones a 250 micrones	Cinco etapas
6 micrones a 50 micrones	Seis etapas
Menos de 1 micron	Siete etapas

Fuente: Ver referencia [60]

La selección correcta del número de etapas está determinada por la presión de succión que debe mantenerse, la magnitud y naturaleza de la carga más la evaluación del coste inicial de operación por el usuario.

Tabla 5.21 Comparación de los diferentes sistemas que usan en las centrales geotérmicas para la extracción de gases no condensables. Este sistema lo hacen los mismos fabricantes de las turbinas. Referencia las tablas 4.2 y 4.3

País	Costa Rica	El Salvador	El salvador	México
Nombre	Miravalles, Unidad I,II y III Guanacaste	Campo Geotérmico de Ahuachapán	Campo Geotérmico de Berlín I,II y III	Los Azufres II, Michoacán
Tipo	Simple flash-condensador	Simple y doble – condensador	Simple , doble y binaria - condensador	Simple, doble y binaria – condensador
Fabricante	Mitsubishi	Mitsubishi	Fiji	General Electric
Sistema de salida de gases	Sistema de eyector salida doble. Sistema de compresor 4 etapas El flujo extraído: (I) 4 kg/s (II)5 kg/s (III)21 kg/s	Extracción de gases del tipo “eyector” dos etapas con Inter condenser y after condenser, enfría 0.2% en peso. para operar un flujo de vapor de 4,100 kg/h de vapor.	Eyectores de doble etapa por cada condensador que elimina el 0.4% en peso total del vapor.	Sistema híbrido para la extracción de gases no condensables.

5.6.2 LIMPIADORES DE VAPOR

El diseño más usa es el practicado en Nueva Zelanda:

- Tres mallas de separación, de plástico con eficiencias de 97%
- Dos de burbujeo
- Los fabricantes de turbinas piden que sea la cantidad de cloruro menor a 10 ppm.
- El agua de limpieza se toma de los mismos separadores libres de cloruros y la cantidad de la misma dependerá de la concentración de cloruros que posea el vapor.

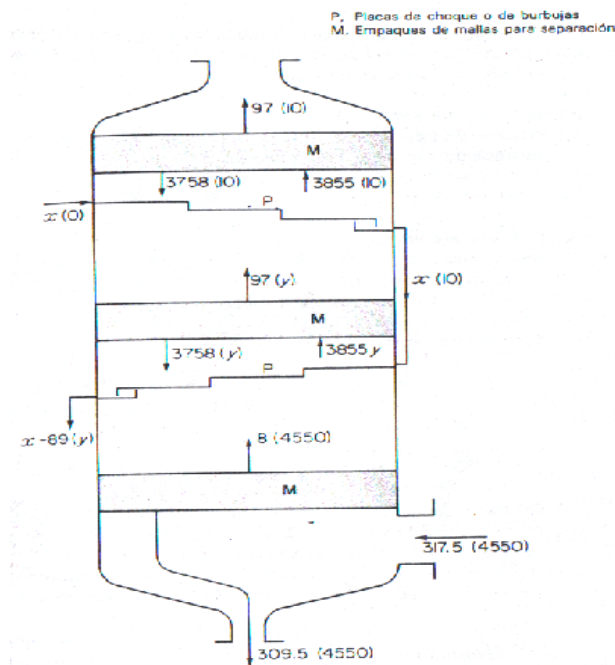


Figura 5.22 Diagrama de un lavador de vapor de baja presión similar a los empleados en Wairakei.[1]

- Las cifras indican flujos en kg/h con el contenido de cloruro en ppm entre paréntesis.
- X, es el agua de lavado y la temperatura esta casi a la misma del vapor a la entrada por lo cual las perdidas no son apreciables

- *El arrastre de agua de las placas de burbujeo es aproximadamente proporcional al gato volumétrico de vapor.*

Ejemplo de cálculo de la figura 5.15: ⁽²⁷⁾

Placa de choque superior

$$\text{Balance de agua} \quad x + 97 + 3\,758 - 3\,855 = \text{derrame} = x$$

$$\text{Balance de cloruro} \quad 10(3\,855 - 3\,758) + 10x = 97y$$

$$970 + 10x = 97y$$

$$x = 9.7y - 97 \quad (1)$$

Placa de choque inferior

$$\text{Balance de agua} \quad x + 8 + 3\,758 - 3\,855 = \text{derrame} = x - 89$$

$$\text{Balance de cloruro} \quad (8 + 4\,550) + 3\,758y + 10x = 3\,855y + (x - 89)y$$

$$36\,400 - 8y - xy + 10x = 0 \quad (2)$$

Sustituyendo la ecuación 1 en la ecuación 2

$$36\,400 - 8y - 9.7y^2 + 97y + 97y - 970 = 0$$

$$y^2 - 19.175y - 3652.5 = 0$$

Por lo tanto, $y = 70.778$

$$y \quad x = (9.7 \times 70.778) - 97 = 589.55.$$

Como conclusión el gasto de agua de limpieza sería alrededor de 590 kg/h y la concentración de cloruro en la placa inferior sería de 71 ppm y no solo se redujo la concentración sino que se volvió al vapor más seco en un 0.5% de humedad y 0.15% por peso

²⁷ Este balance corresponde al ejemplo desarrollado en Wairakei, Nueva Zelanda, ver referencia [1]

5.6.3 TANQUES DE RECOLECCIÓN

Para diseñar un tanque lo que se hace es medir el caudal de agua que va ingresar y el tiempo de llenado del mismo para saber por medio de sensores cuando se tiene que desechar el fluido para que ocurran inundaciones. Además se vera el espacio físico y las características del fluido para según eso escoger los materiales, dimensión y propiedades de los mismos

Cuando las fluctuaciones son de periodos largos los tanques no resuelven el problema, por lo tanto se da una solución como la realizada en la mayoría de las plantas por medio de válvulas de descarga por flotador (costosas), o sino, se sigue lo inventado en varios campos húmedos por medio de orificios de boquilla acampanada, por donde pasa una amplia gama de fluidos sin inundación corriente arriba del vapor y sin pérdidas de sellamiento.

5.6.4 SILENCIADORES

Cuando la producción de vapor es muy grande en términos de cantidad de caudal sobre la capacidad de producción de la planta es necesario este exceso desecharlo para no someter al sistema a sobrepresiones que puedan causar daños; el ruido que genera los vapores desechados puede ocasionar muchas molestias no solo para quienes trabajan cerca de la planta sino para la fauna y las personas aledañas a la zona de desecho.

Estos equipos también son utilizados a la salida del agua hirviente porque al ser desechada al ambiente se produce evaporización instantánea que su vez produce ruido.

Además de los casos nombrados se desecha vapor o agua caliente para cuestiones de mantenimiento o en casos de emergencia (sobre presión) a lo largo de todo el sistema de explotación, conducción y producción.

El diseño más utiliza ha sido el inventado en Nueva Zelanda, donde:

Es un silenciador sencillo y económico, compuesto por una palca doblada en V hecha de acero de alta resistencia, por donde pasa el fluido; la placa esta instalada de manera tangencial a la estructura externa hecha en forma de torres cilíndricas gemelas. El fluido al girar alrededor de los cilindros va formando remolinos con lo cual pierde energía cinética por la fricción dicho fluido.

Por último a la salida se lo hace pasar por un vertedero de medición hacia un canal de desecho o bien hacia la atmosfera.

Este tipo de silenciadores tienen la finalidad de bajar el tono del ruido desde un nivel estridente de alta frecuencia a un ronquido tolerable de baja frecuencia.

En los inicios se los construyeron de concreto pero fallaron en servicio debido a las condiciones de erosión, alta temperatura y vibración mecánica; en la actualidad se ha encontrado un material muy bueno con una vida útil de 12 años que es la madera tratada, pino radiata con un 5% de pentaclorofenol en aceite industrial Shell No. 4.

En Islandia se ha utilizado un relleno de roca en un contenedor de acero.

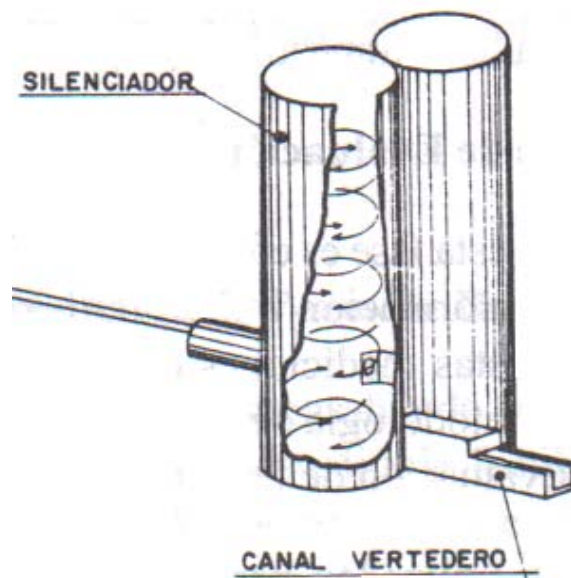


Figura 5.23 silenciadores para centrales geotérmicas.

5.6.5 BOMBAS

Las bombas que se usan en las centrales geotérmicas y en especial para la de Chachimbiro son bombas Electrobombas radiales o centrífugas, son accionadas por motores eléctricos que usan la energía de la misma central.

Estos elementos se colocan en cuatro partes fundamentales:

- Para hacer circular el fluido desde el condensador a la torre de enfriamiento (si se la usa).
- Para la circulación desde la torre de enfriamiento hacia el condensador.
- Para mover de los tanques de recolección el agua caliente si se usa en alguna planta de uso directo como secado, producción de lácteos, etc.
- En la parte superficial del cabezal del pozo solo si la presión de salida del fluido es menor que la atmosférica.

Calculo de la potencia; Si se requiere mover el fluido por el condensador hacia la torre de enfriamiento o viceversa se utilizará una bomba o ventilador:

$$P_{e,r} = Q_r v_r \Delta p_r / \eta_{b,r} \quad (28)$$

Donde: v_r es el volumen específico del fluido refrigerante dado en m^3/kg .

Δp_r Es la diferencia de presión entre bocas de aspiración e impulsión.

$\eta_{b,r}$ es la eficiencia del grupo motobomba o del ventilador de refrigeración.

Q_r es el caudal.

5.6.6 DIÁMETROS DE LOS POZOS

Los diámetros de los pozos depende exclusivamente de la producción y de las características del fluido es así que si se tiene un pozo muy pequeño se restringen la producción, pero si se tiene uno muy grande aparte de ser más costoso, mayor demora en la perforación, podría hacer que el fluido pierda presión y no suba

²⁸ Formulas de una misma fuente de información ver referencia [2]

naturalmente por lo cual se tendría que bombear o inyectar, lo que significa más costos. Siempre es aconsejable realizar pozos medianos y según la producción se los puede ir incrementando de tamaño; los autores H. Christopher y H. Armstead nos dan una referencia de tamaños según la experiencia:

Tabla 5.22 Guía para tamaños óptimos de pozos

<i>Flujo de vapor (ton/hora)</i>	<i>Diámetro de pozo (pulgadas)</i>	<i>Diám. tubería de ademe d.e. (pulg)</i>	<i>Clasificación del ademe</i>
10-25	17	13 3/8	De superficie
	12 1/4	9 5/8	Intermedio
	8 5/8	7	De producción
	6 1/4	4 1/2	Revestimiento ranurado
25-50	18	16	De superficie
	14 3/4	11 3/4	Intermedio
	10 5/8	8 5/8	De producción
	7 5/8	6 5/8	Revestimiento ranurado (d.e. de cople rebajado)
50-80	22	18	1/16 pulg)
	17	13 3/8	De superficie
	12 1/4	9 5/8	Intermedio
	8 5/8	7	De producción Revestimiento ranurado

Fuente: Ver la referencia [3]

En Chachimbiro se cree tener 3 pozos con un total de 180 kg/s de fluido geotérmico, según lo expuesto en la sección 4.1.2, con lo que tenemos:

$$180 \times 3600 / 1000 = 648 \times 0.25 = 162 \text{ ton/hora de vapor-agua}$$

162/3 pozos = 54 ton/hora de vapor-agua, con lo que obtenemos que la tubería de:

- Superficie es de 22 in.
- Intermedio de 17 in
- De producción de 12 1/4 in
- Revestimiento ranurados 8 5/8

5.7 Aislamientos térmicos.

Cuando hablamos de transportar fluidos y en este caso agua caliente o vapor, mientras más lejano sea el punto de entrega al pozo mas perdidas de calor habrá, esto es debido a que la tubería absorbe una cierta cantidad del calor del fluido, es por ello que se debe cubrir o proteger a estas tuberías con los llamados aisladores térmicos; no son más que materiales que impiden en gran grado la transferencia de calor del fluido al exterior de la tubería evitando las caídas de temperatura y en casos de conducir vapor que este llegue al estado de condensación. Para lograr una eficiencia del vapor y a la vez ahorrar energía.

En los sistemas de tuberías hay tres subsistemas donde se colocan los aislantes que son:

- En la recolección del fluido térmico, Esto es en la tubería que se usa desde el yacimiento hasta la válvula del cabezal de pozo, este es un aislamiento metálico muchas veces que lo que hace es reforzar y endurecer el material primario de la tubería como con cemento, y también depende mucho del tipo de suelo que hace que el calor no se disipe muchas veces. En este diseño se ocupan los propios dueños de la perforación que es un tema propio de análisis y estudio.
- En la inserción del fluido geotérmico, Es como el caso anterior con la diferencia que este proceso de inserción o reinyección de fluidos aun esta en estudio y no se tiene mayores resultados sobre dicho tema; hay solo dos lugares donde se lo está practicando alrededor de todo el mundo.
- En el transporte del fluido geotérmico, en esta sección de tuberías que es la más larga y en donde se pone mayor hincapié en la pérdidas de calor que se generan al transportar los fluidos geotérmicos.

Una tubería sin aislar o mal aislada, aparte de las pérdidas de energía, ocasiona problemas mecánicos por el incremento de condensados, ales como:

- Al tener condensados adicionales a los producidos por los intercambiadores, las trampas de vapor deberán desalojarlos teniendo que trabajar más, con mayor desgaste y mayor mantenimiento.
- Ocurre mayor desgaste de tuberías por el transporte de condensados.
- Riesgo grande de golpes de ariete, principalmente en las tuberías mal drenadas.

En las centrales geotérmicas el material más utilizado es la magnesia por su costo económico y su gran eficacia, pero también se ha visto que se utiliza el material vermiculita que en muchos casos es propio de las zonas donde se construyen dichas centrales.

Es una realidad no obtener un aislante perfecto, que no permita ninguna pérdida de calor, en tuberías tan largas con las de las centrales no se pueden dar el lujo de poner materiales muy costosos, sino que se ven materiales baratos como los nombrados que evitan las caídas de temperatura en un 90%, como ejemplo el caso de Islandia donde en 15 km de transporte se pierde 0.2C/km que es una pérdida aceptable para los ingenieros del proyecto.

Siguiendo con lo expresado en subcapítulo 5.5 sección 5.5.2, cuando se tienen las temperaturas interior y exterior; un diámetro de tubería determinado se tiene que el calor disipado también dependerá del aislante y de su espesor, para lo cual se usa los siguientes términos:

Coste de aislante, esta es una función directa con el espesor, ya que al aumentar el volumen de aislante también aumentará la cantidad de superficie cubierta por el aislante.

Coste debido a la pérdida de calor útil, este es un valor inverso al espesor mientras mayor sea el espesor del aislante menor serán las pérdidas de calor.

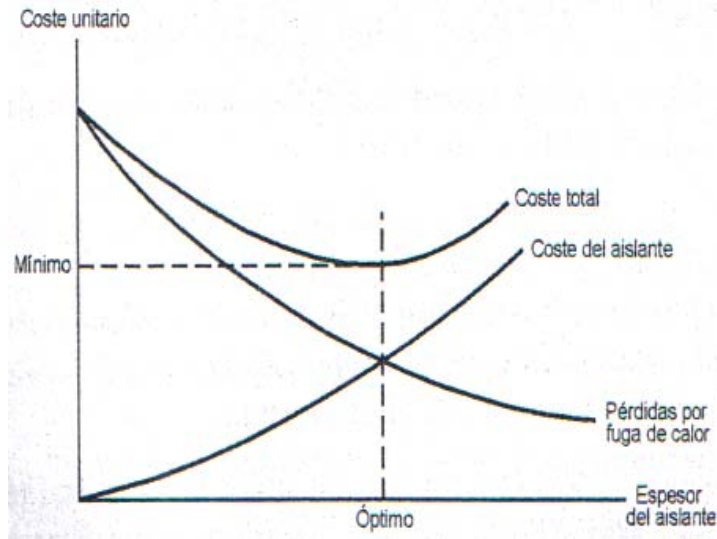


Figura 5.24 Representación ilustrativa de la variación del coste de la conducción de agua caliente en función del espesor del aislante. [2]

Con esto se obtiene un espesor óptimo para un coste mínimo de aislante. Para que la instalación de un aislamiento térmico resulte óptima y se obtengan beneficios reales, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Aislar con la tubería, los accesorios adicionales tales como bridas y otros. Una brida sin aislar causa una pérdida equivalente a la de 30 Cm de tubería.
- Trabajar el aislamiento de tal forma que por ningún motivo éste se humedezca. La presencia de agua en el aislamiento causa un aumento muy importante de las pérdidas de calor. A la vez que si esta es continuada y la tubería no tiene un uso continuo, se puede presentar corrosión generalizada.
- No exagerar en el espesor del aislamiento, porque al duplicar éste sólo se reducen las pérdidas en aproximadamente un 25% con respecto al espesor original.

Ejemplos:

En la central de Miravalles, Costa Rica sobre la tubería se coloca una capa de un aislante térmico (fibra de vidrio) de dos pulgadas de ancho. Sobre el aislante

térmico se coloca una lámina muy delgada de aluminio para evitar que el aislante térmico se humedezca con las lluvias y se desgare o se deteriore.

En la central de Nesjavellir, Islandia la tubería está hecha de acero, con un aislante externo de lana de roca (rock wool) cubierto de plástico y aluminio allí donde el conducto discurre por encima del suelo, pero con un aislamiento de uretano cubierto de plástico cuando va bajo tierra. El aislamiento de la tubería es tan efectivo que la nieve que se acumula sobre ella no se funde.

Cuando se quiera conocer con exactitud el espesor de aislante requerido se deberán hacer pruebas de carácter laboratorio y de campo.

5.8 BALANCE ENERGÉTICO DEL SISTEMA SELECCIONADO

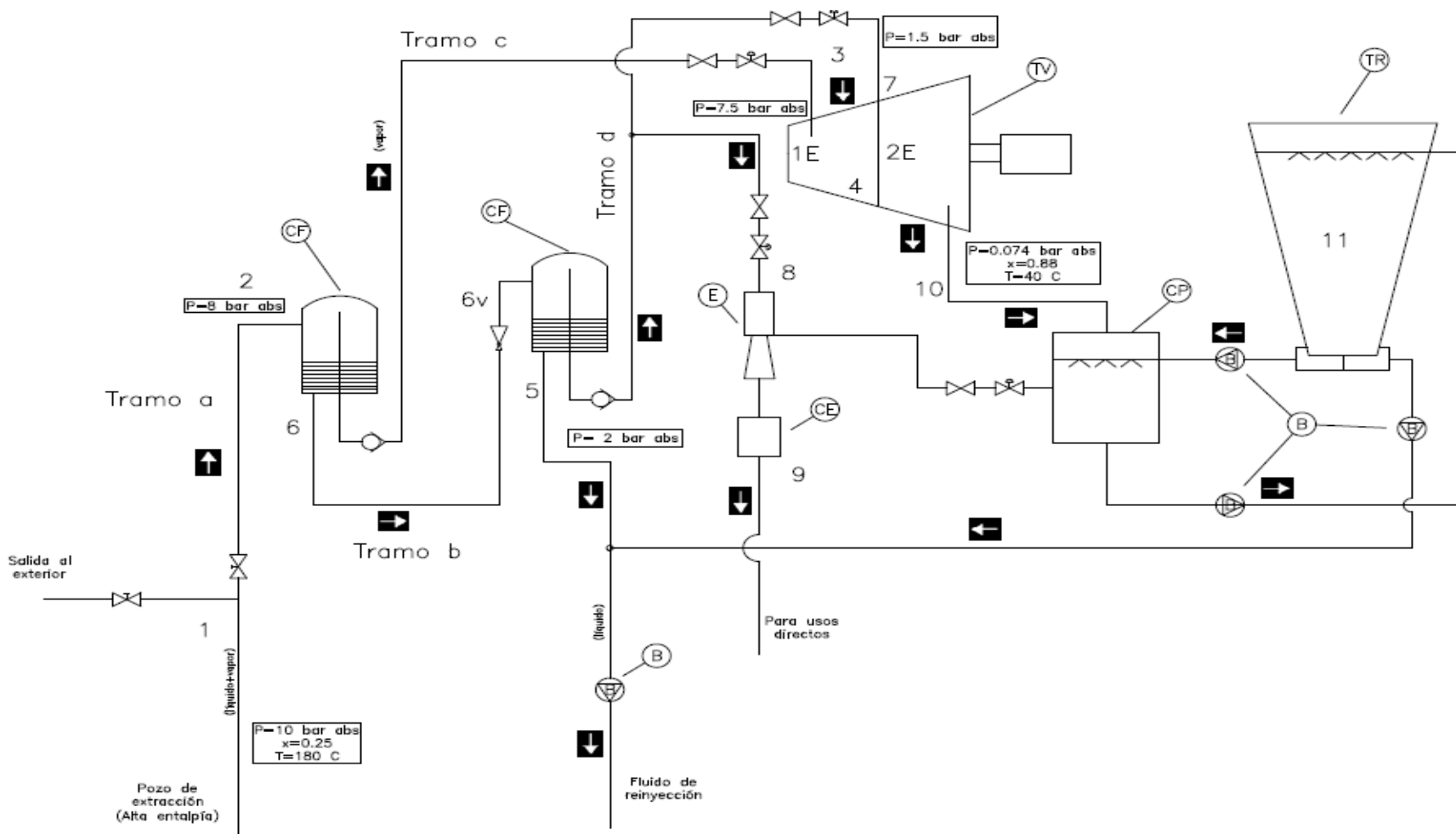


Figura 5.23. Esquema general de Proceso (Para mayor detalle ver anexo 3)

A continuación se presenta la tabla de resultados obtenida del proceso (Para ver el detalle de los cálculos realizados en este balance ver el anexo 2), teniendo así:

Tabla 5.23 Resultados del proceso

Localización en el esquema del proceso Figura 5.23	Potencia consumida	Esta es una aproximación de 1.5MW, donde se incluye el consumo de dos bombas, ventiladores, iluminación, etc.			
Turbina (TV)	Potencia neta máx. (MW)	17			
	Potencia neta min. (MW)	5			
	Eficiencias en la turbina (KW)	$\eta_i = 0.70$	$\eta_m = 0.85$	$\eta_e = 0.90$	Con extracción intermedia
	Consumo específico vapor (Kg/h Kw)	19.4-22		180 (Kg/s)	3 pozos de producción y 1 de reinyección
CF	Separadores	Son ciclónicos con eficiencia del 95%			
CP	Condensadores	1. 114 MWt Potencia máx. A disipar por el condensado principal 2. Del secundario dependiendo del uso y de la extracción intermedia, con una máxima 28MWt			
Eyector (E)	Extracción de gases no condensables	Por medio de un eyector de dos etapas, usa parte del vapor seco para su funcionamiento.			
TR	Torre de enfriamiento (valores máximos cuando la central solo funciona para generación eléctrica sin extracción intermedia)	Será de tiro forzado con ventiladores.			
		Caudal de agua (Kg/s)	913	$\Delta T = 30\text{ }^\circ\text{C}$	
		Caudal de aire (Kg/s)	4900	$\Delta T = 9\text{ }^\circ\text{C}$	
		Caudal de consume para reponer (Kg/s)	250	Δ humedad =5%	
		Caudal de reposición al salir de la turbina (Kg/s)	10	Por tener a la salida un vapor de 0.888 de calidad	
Al final del balance	Eficiencia térmica (ciclo cerrado)	15.5% máx.			
	Eficiencia térmica (ciclo abierto)	6.8%			

5.9 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON UN SOFTWARE BÁSICO Y DE FÁCIL USO PARA CÁLCULOS EXPERIMENTALES DE GEOTERMIA.

En este análisis lo que se muestra es como el uso de un software llamado ceaceo versión 1.0 que se lo puede descargar una vez comprado el libro de la pagina web

<http://www.editorialceac.com/libro.asp?materia3=118&cod=C0619&fam=1> y se basa en los cálculos e investigaciones de:

Energía geotérmica

Autor/es: Jaume Pous / Luis Jutglar

Precio: 19,64 euros

ISBN: 8432910619

Fecha de publicación: 1/6/2004

Este es de fácil uso, nos permite comparar los valores obtenidos por medio de las formulas de cada uno de los ciclos ya estudiados y tener una referencia de resultados de:

- Variación de la temperatura de la roca con la profundidad.
- Termómetros químicos.
- Generación eléctrica.
- Calculo de la carga térmica de un invernadero.
- Calculo de la carga térmica de la piscina de una piscifactoría.
- Cálculo del depósito térmico: evolución de la temperatura.
- Energía de calefacción máxima extraíble de un recurso geotérmico.

Para este caso usando el punto 3 con los datos de titulacion, temperatura y caudal llegamos a obtener los siguientes resultados de presion, volumenes en cada seccion despues de la separación sin perdidas y la potencia electrica con rendimientos:

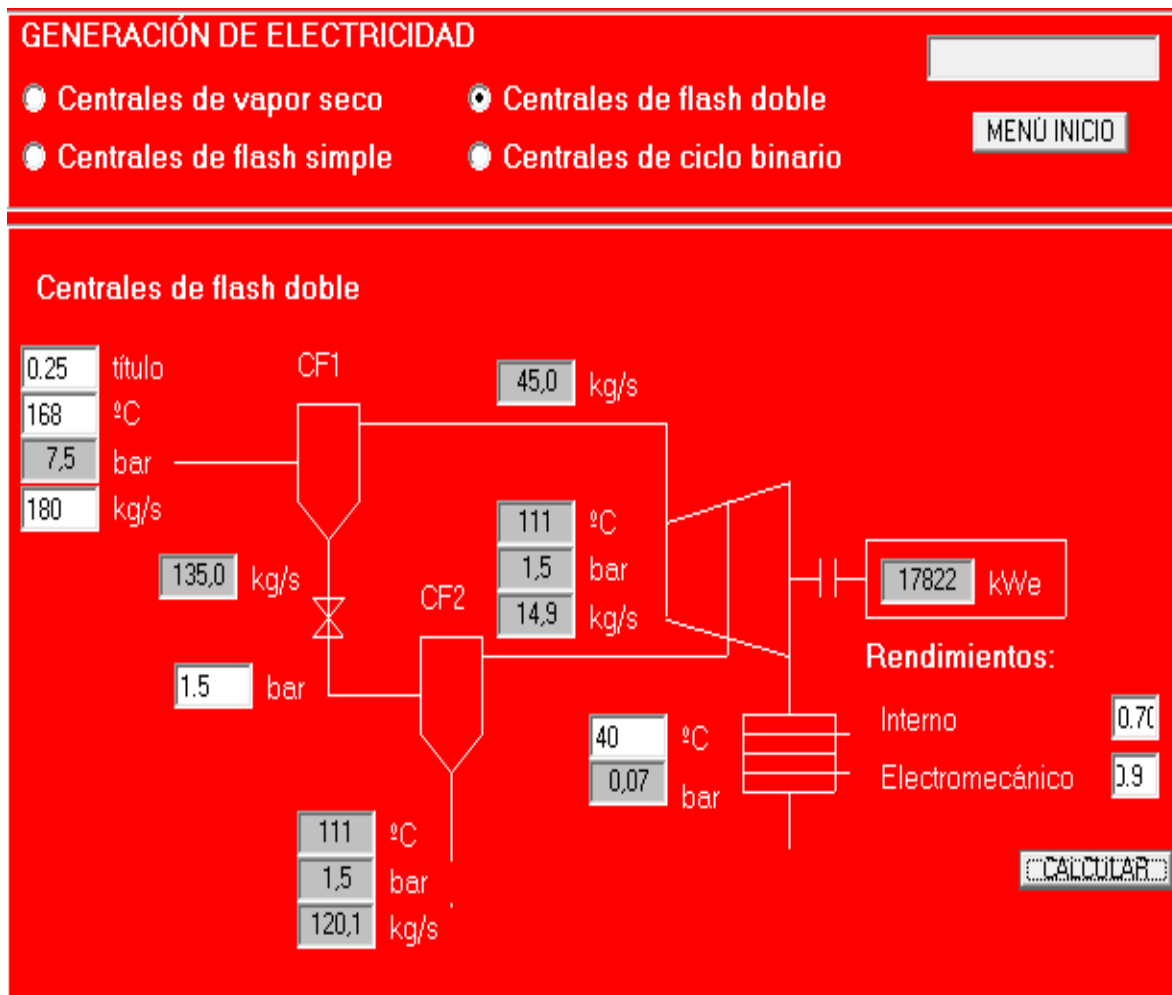


Figura 5.26, En esta figura se representa un central de vapor de doble separación instantánea por medio del uso de un software.

Según estas graficas de proceso se confirma una vez más que la central de doble flashing es mejor y se obtiene una mayor potencia eléctrica 14% más, que la de simple flashing.

Además los cálculos realizado utilizando las formulas son muy similares a los obtenidos por el software solo en algunos casos varían debido a que en el software no se usan las eficiencias de los separadores ni la calidad del vapor a la salida de cada una de sus etapas como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5.24 Comparación de resultados entre el programa y los cálculos manuales.

Ítem	Formulas	Software	Comparación
Presión primera etapa en la turbina	7.5 bar	7.5 bar	Igual
Caudal ingreso a la primera etapa de la turbina.	43 Kg/s	45 Kg/s	5% menos por considerar la eficiencia del separador.
Caudal ingreso al segundo separador	135 Kg/s	135 Kg/s	igual
Temperatura de vapor a la salida del segundo separador	111.7 °C	111 °C	Casi igual
Presión de vapor a la salida del segundo separador	1.5 bar	1.5 bar	Igual
Caudal de vapor a la salida del segundo separador	14.2 kg/s	15 kg/s	5% menos por considerar la eficiencia del separador.
Caudal de agua a la salida del segundo separador	120 kg/s	120.1 kg/s	Igual
Presión a la salida de la segunda etapa de la turbina	0.074 bar	0.074 bar	Igual
Potencia eléctrica generada neta	17 MW	17.8 MW	5% se da esta diferencia porque una parte del vapor se usa para el funcionamiento del eyector.

5.10 PERFIL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.

En el punto anterior se comprobó que el software utilizado y que los cálculos realizados mediante formulas ofrecen resultados muy similares por lo que para este perfil de generación se usará el software que es de aplicación más rápida.

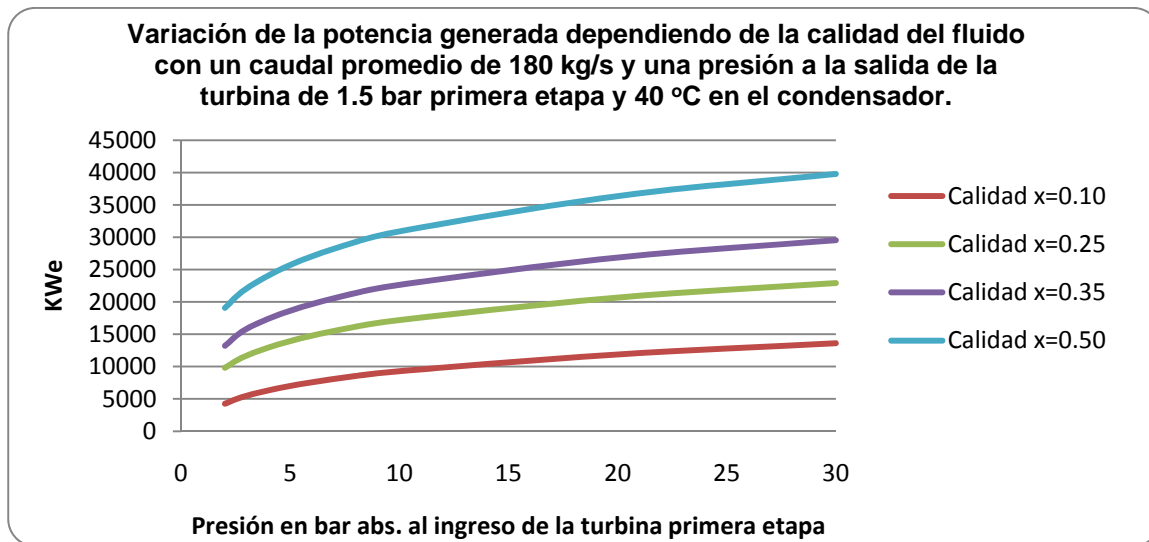


Figura 5.27, Variación de la potencia generada dependiendo de la calidad del fluido.

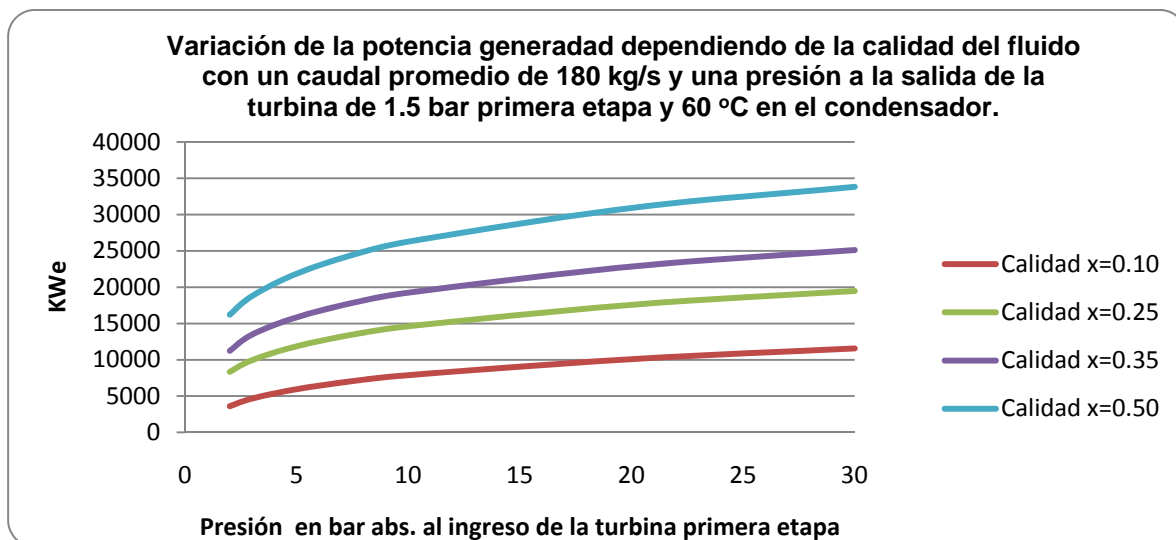


Figura 5.28, Variación de la potencia generada dependiendo de la calidad del fluido.

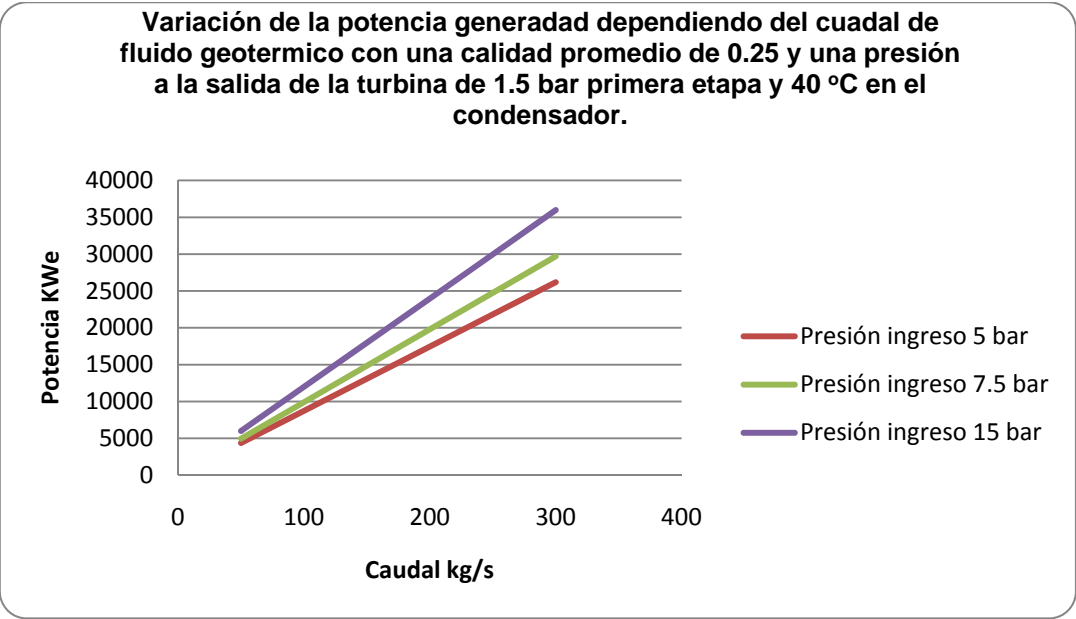


Figura 5.29, Variación de la potencia generada dependiendo del caudal del fluido geotérmico.

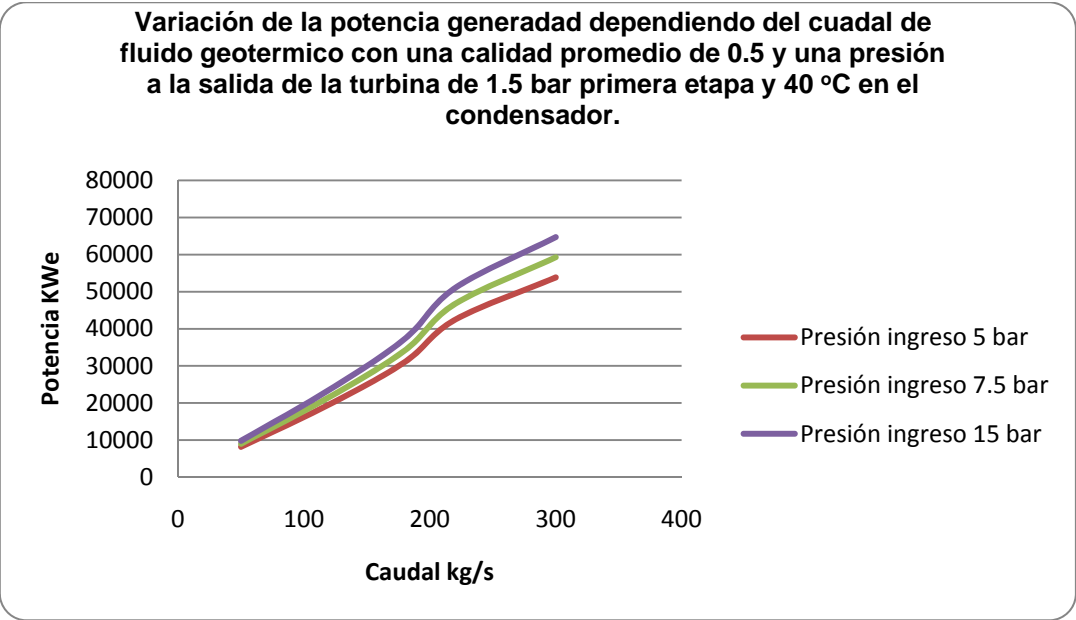


Figura 5.30, Variación de la potencia generada dependiendo del caudal del fluido geotérmico.

Estas graficas muestran las variables sensibles de un proceso de generación de electricidad mediante el uso de la geotermia, y son:

VARIABLES SENSIBLES DE BOCA DE POZO:

- Presión de ingreso a la turbina en la primera etapa. Con su Temperatura real o de saturación.
- La calidad del fluido a separar.
- Caudal del fluido geotérmico a usarse.

VARIABLES SENSIBLES A LA SALIDA DEL SISTEMA:

- Presión de salida a la turbina en la primera etapa.
- Presión de salida a la turbina en la segunda etapa. Con su Temperatura real o de saturación.

Obteniendo como resultado la potencia de generación eléctrica.

De estas cuatro figuras lo que se puede concluir lo siguiente:

- Mientras más se reduzca la presión de salida de la turbina en la segunda etapa, se aumentara la potencia.
- Mientras mejor o mayor sea la calidad del fluido vapor-agua se obtendrá mayor caudal para la producción de energía y en consecuencia mayor producción de energía eléctrica.
- Mientras mejores sean las condiciones en boca de pozo esto es mientras las variables sensibles sean valores altos se tendrá mayor cantidad de energía eléctrica por unidad de masa.

CAPITULO 6

FACTIBILIDAD ECONOMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN

6.1 GENERALIDADES

Debido a que el proyecto de Chachimbiro se encuentra en una primera etapa de desarrollo donde no se tiene valores de producción y consumo reales, esta factibilidad se la hará en base a los datos usados teóricos en los capítulos anteriores.

El presente análisis se lo hace para un periodo de 30 años después de haber perforado los primeros pozos de factibilidad, tiempo en el cual se podrá con la central geotérmica de 15 MW obtener muchas conclusiones para una extensión del mismo o para nuevos proyectos de características similares.

Como mano de obra directa consta el sueldo anual de una persona, que dependerá del grado de estudio y de la necesidad que la central tenga para su constante y diario funcionamiento y como mano de obra indirecta el sueldo anual de una persona que realice algún tipo trabajo temporal en la central.

Lo que la central produce es energía, y su costo de venta para el sector industrial esta 0,05 USD por KW-h y para el sector domestico 0.08 USD por KW-h.

Dentro de los costos indirecto y directos no se menciona los de los servicios básicos debido a que la energía la proporciona la misma central, el agua se tendría que buscar vertientes fresca ya que la en la zona el agua potable es escaza y en el lugar de estudio nula. El único servicio que tendrá que tomar en consideración es el de las telecomunicaciones.

6.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA

6.2.1 COSTOS DE INVERSIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.

El costo de producción de energía geotérmica está determinado, entre otras, por las inversiones en: exploración, perforación, líneas de transmisión del fluido y de construcción de la central o centrales de generación.

Sanyal (2004)

²⁹ estimó mediante una fórmula el valor del capital inicial, de una central de 5 hasta 150 MW. Así para el capital inicial es = $2500e^{-0.0025(P-5)}$ donde P es el potencial eléctrico en MW.

De lo cual se tiene un valor referencia de 2438,27 \$/KW.

6.2.2 INVERSIÓN INICIAL

Tabla 6.1 Valores de inversión inicial

Áreas	Porcentaje promedio que se considera experimentalmente basado en los estudios de las referencias 1-2,21,34-35,48	Costo \$/KW	KW instalados	Costo \$
exploración y confirmación	7%	171	15000	2.560.184
Perforación	27%	658	15000	9.874.994
Central de producción	62%	1512	15000	22.675.911
Transmisión	4%	98	15000	1.462.962
Total	100%	2438		36.574.050

²⁹ Mayor información en la referencia 36

Tabla 6.2 Detalle de la inversión en el área de la central de producción basado en el área económica de la Central de Producción de la tabla 6.1

Central de producción	Porcentaje de la inversión en esta área.	Valor
Inversión del equipo de producción	75%	17.006.933
Ingeniería	4%	907.036
Construcción	20%	4.535.182
Puesta en servicio	1%	226.759
Total		22.675.911

6.2.2.1 Detalle aproximado de la inversión de cada uno de los elementos y del sistema.

Tabla 6.3 Inversión de los principales elementos de la central geotérmica de 15 MW, basados en valor de la inversión del equipo de producción de la tabla 6.2

Elemento	Inversión de unidades instaladas \$/kw	% del valor de la inversión del equipo de producción.	Valor \$
Sistema Separador y limpieza del vapor	25-100	3%	510.208
Turbina-generador	1000-1800	60%	10.204.160
Condensador	60-130	4%	680.277
Torre de enfriamiento	100-300	10%	1.700.693
Sistema de abatimiento	33	2%	255.104
Sistema de gases no condensables	9	1%	85.035
Sistema de tuberías	>400	21	3.571.456
Total	2438		17.006.933

6.2.3 COSTOS DIRECTOS E INDIRECTOS DE PRODUCCION

Tabla 6.4 Costos directos e indirectos Anuales

Servicio	Porcentaje equivalente de Puesta de servicio Tabla 6.2	Costo anuales \$	
Mantenimiento	5%	136.055	
Mano de obra total, esto incluida la directa como la indirecta mínima requerida.	15%	408.166	
Total 1		544.222	
Servicio	Porcentaje	Correspondiente	
Perforación anual para mantener la producción requerida en la central.	5%	Se considera que esta perforación para mantener la producción es un % de la Perforación inicial. (Tabla 6.1)	493.750
Costo del capital	8-12%	Es la amortización del equipo de producción, Ingeniería, Construcción, etc. (Tabla 6.2)	740.822
Total 2		1.234.572	
Total final (1+2)		1.778.794	

6.2.4 GASTOS GENERALES

Tabla 6.5 Gastos generales

Los gastos generales representan del 20-30% del total de los costos de producción. Tabla 6.4		
Elemento	Porcentaje	Costo total
Sueldos administrativos y guardianía	60%	266.819
Servicio de telecomunicaciones	20%	88.940
Campañas de promoción de los recursos a la gente del sector.	10%	44.470
Programas de desarrollo comunitario.	10%	44.470
Total	100% del 20-30% del total de los costos de producción. Tabla 6.4	444.698

6.2.5 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ANUAL

Tabla 6.6 Producción anual de energía variando la capacidad productiva de la central en cada periodo anual.

Capacidad productiva %	AÑO	producción (KWh)	Precio unitario \$/kwh	Venta \$
30	Año 1	16.200.000	0,13	2.106.000
40	Año 2	21.600.000	0,13	2.808.000
60	Año 3	32.400.000	0,13	4.212.000
70	Año 4	37.800.000	0,13	4.914.000
80	Año 5	43.200.000	0,13	5.616.000
80	Año 6	43.200.000	0,13	5.616.000
80	Año 7	43.200.000	0,13	5.616.000
80	Año 8	43.200.000	0,13	5.616.000
80	Año 9	43.200.000	0,13	5.616.000

Tabla 6.6 Producción anual de energía dependiendo de la capacidad productiva de la central en cada periodo anual. (Continuación)

70	Año 10	37.800.000	0,13	4.914.000
90	Año 15	48.600.000	0,13	6.318.000
90	Año 20	48.600.000	0,13	6.318.000
85	Año 25	45.900.000	0,13	5.967.000
70	Año 30	37.800.000	0,13	4.914.000
	promedio	38.764.286	0,13	5.039.357

6.2.6 COSTOS DE PRODUCCIÓN Kw/h EN COMPARACIÓN CON CENTRALES DE SIMILARES CARACTERÍSTICAS.

La gran mayoría de centrales geotérmicas alrededor del mundo manejan un costo de producción entre 4 a 15 centavos por KWh: en el Caribe 0,12-0,15; Usa 0,04-0,10 y Centro América 0,03-0,10

Tabla 6.7 Costo aproximado de un KWh de energía eléctrica producida por otras fuentes de energía.

TIPO DE CENTRAL	COSTO DE LA ELECTRICIDAD ¢US/kWh
Eólica	5-22
Carbón	3-11
Nuclear	4-18
Fuel-Oil	4-14
Gas Natural	2-10
Hidráulica	3-20
Biomasa	6-14
Fotovoltaica	10-37

Nota: Esta tabla ha sido totalmente transcrita del libro “Energía renovable”, Jennifer Carless, Edición 1995, Edamex SA México.

Tabla 6.8 Costo aproximado de un KWh de energía eléctrica producida por geotermia de este proyecto

Costos+ Gastos anuales	Observación	Valor \$
Pago de la deuda anual de la inversión inicial.	Depende de a cuantos años se haga el financiamiento y de la tasa anual de intereses.	1.523.919
Costos de producción	Tabla 6.4	1.778.794
Gastos generales	Tabla 6.5	444.698
Total costos gastos.		3.747.411
Producción de energía (promedio anual) KWh	Tabla 6.6	38.764.286
Resultado		
\$/KWh	Es la división entre el total de costos gastos anuales para la producción anual	0,10

6.3 EVALUACIÓN FINANCIERA

6.3.1 EL PUNTO DE EQUILIBRIO

Tabla 6.9 Costos Fijos y variables, a los costos directos e indirectos más los pagos de la inversión y los gastos se los re-clasifica para encontrar el punto de equilibrio.

Costos fijos y variables			
Fijos		Variable	
Concepto	Costo	Concepto	Costo
Pago de deuda anual	15.23.919	mantenimiento	136.055
mano de obra	408.166	mano de obra extra	40.816
Sueldos administrativos y guardianía	266.819	perforación extra	493.750
		amortización	740.822

Tabla 6.9 Costos Fijos y variables (Continuación)

		Servicio de telecomunicaciones	88.940
		Campañas de promoción de los recursos a la gente del sector.	44.470
		Programas de desarrollo comunitario.	44.470
Total	2.198.904		1.589.323

La fórmula para encontrar el punto de equilibrio está dada por:

Donde

CF, es el costo fijo

$$pequilibrium = \frac{CF}{p - cv}$$

p, es el precio unitario de cada kw vendido

cv, es el costo variable unitario.

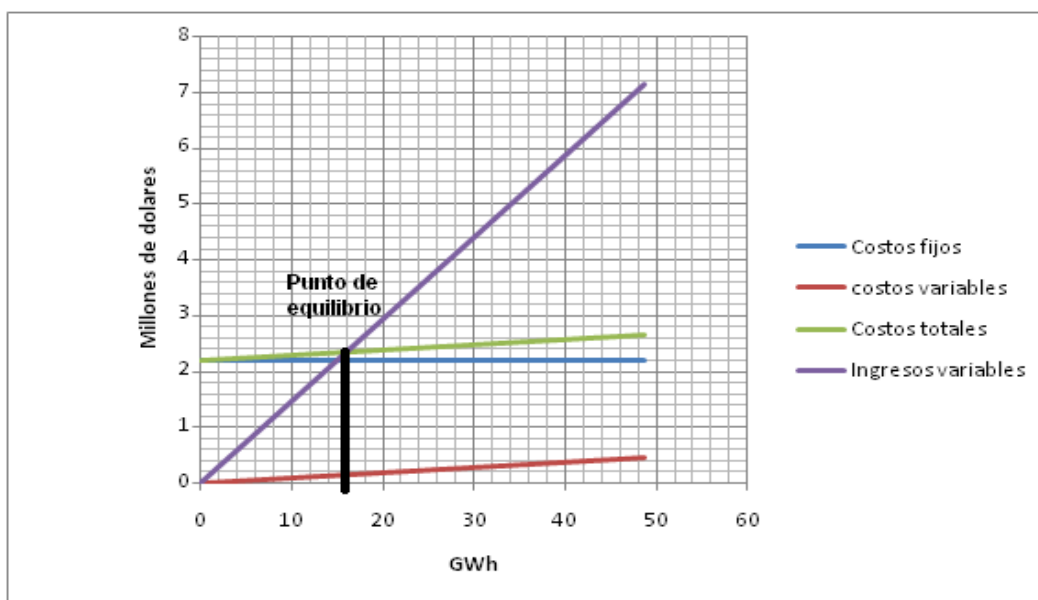


Figura 6.1. Determinación del punto de equilibrio.

Tabla 6.10 Punto de equilibrio anual

Costos fijos (\$)	Costos variables unitario (KW/\$)	Precio unitario (\$)	punto de equilibrio (KWh)	Producción KW mínimos
2.198.904	0,009	0,130	18.238.780	5.066

6.3.2 BALANCE ECONÓMICO-ENERGÉTICO. (PÉRDIDAS Y GANANCIAS)

Tabla 6.11 Balance económico-flujo de caja (pérdidas y ganancias)

Balance económico-flujo de caja. (pérdidas y ganancias)						
	Año 1-5	Año 6-10	Año 11-15	Año 16-20	Año 21-25	Año 26-30
Ingreso	3.931.200	4.703.400	5.510.700	5.914.350	5.940.675	5.427.338
Pago de deuda anual	1.523.919	1.523.919	1.523.919	1.523.919	1.523.919	1.523.919
Costo de operación anual promedio	1.778.794	1778794	1778794	1778794	1778794	1.778.794
Gastos anual	444.698	444.698	444.698	444.698	444.698	444.698
Total de egresos anual	3.747.411	3.747.411	3.74.7411	3.747.411	3.747.411	3.747.411
Utilidad operativa promedio anual	183.789	955.989	1.763.289	2.166.939	2.193.264	16.79.927
15% parte trabajadores	27.568	143.398	264.493	325.041	328.990	251.989
25% impuesto a la renta	45.947	238.997	440.822	541.735	548.316	419.982
5% inversión para mejoras	9.189	47.799	88.164	108.347	109.663	83.996
Utilidad neta	101.084	525.794	969.809	1.191.817	1.206.295	923.960

6.3.3 ÍNDICES DE EVALUACIÓN DEL PROYECTO

Tabla 6.12 Índices de evaluación del proyecto.

CONCEPTO	VALOR	PROYECTO	
		VIABLE	NO VIABLE
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	80.63%	x	
VALOR ACTUAL NETO (VAN)	7545043	x	
PERIODO REAL DE RECUPERACION EN AÑOS (PRR)	Se recupera la inv. en los 20 años		

Nota: para estos cálculos se usaron las funciones del Excel 2007.

6.4 Financiamiento.

Obligadamente el financiamiento se lo deberá hacer a través de una entidad bancaria como el BID o bancos particulares.

Si no es por medio de una empresa estatal la forma de negociación es por medio de venta vapor y compra KWh, para lo cual lo que se hace llamar a concurso, donde empresas extranjeras en una subasta pública dan a conocer los valores de venta y compra KWh para el estado por un periodo determinado.

CAPITULO 7

MANTENIMIENTO Y SEGURIDAD INDUSTRIAL

7.1 CONCEPTO Y GENERALIDADES

El mantenimiento asegura el perfecto funcionamiento de los equipos, maquinas, herramientas e instalaciones en el máximo tiempo posible para prevenir posibles fallas. El mantenimiento debe promover la alta disponibilidad de los equipos para producción y que no haya paradas inesperadas que retrasen el proceso productivo y redunden en pérdidas.

Tipos de mantenimiento

Existen tres tipos reconocidos de operaciones de mantenimiento, los cuales están en función del momento en el tiempo en que se realizan, el objetivo particular para el cual son puestos en marcha, y en función a los recursos utilizados, son:

a) *Mantenimiento Correctivo*

Este mantenimiento también es denominado “mantenimiento reactivo”, tiene lugar luego que ocurre una falla o avería, es decir, solo actuará cuando se presenta un error en el sistema. En este caso si no se produce ninguna falla, el mantenimiento será nulo, por lo que se tendrá que esperar hasta que se presente el desperfecto para recién tomar medidas de corrección de errores.

Este mantenimiento trae consigo las siguientes consecuencias:

- Paradas no previstas en el proceso productivo, disminuyendo las horas operativas.
- Afecta las cadenas productivas, es decir, que los ciclos productivos posteriores se verán parados a la espera de la corrección de la etapa anterior.

- Presenta costos por reparación y repuestos no presupuestados, por lo que se dará el caso que por falta de recursos económicos no se podrán comprar los repuestos en el momento deseado.
- La planificación del tiempo que estará el sistema fuera de operación no es predecible.

b) *Mantenimiento Preventivo*

Este mantenimiento también es denominado “mantenimiento planificado”, tiene lugar antes de que ocurra una falla o avería, se efectúa bajo condiciones controladas sin la existencia de algún error en el sistema. Se realiza basado estrictamente en las recomendaciones del fabricante de cada equipo y con la experiencia y pericia del personal a cargo, los cuales son los encargados de determinar el momento necesario para llevar a cabo dicho procedimiento.

Presenta las siguientes características:

- Se realiza en un momento en que no sé esta produciendo, por lo que se aprovecha las horas ociosas de la planta.
- Se lleva a cabo siguiendo un programa previamente elaborado donde se detalla el procedimiento a seguir, y las actividades a realizar, a fin de tener las herramientas y repuestos necesarios listos para ser utilizados.
- Cuenta con una fecha programada, además de un tiempo de inicio y de terminación preestablecido y aprobado por la directiva de la empresa.
- Esta destinado a un área en particular y a ciertos equipos específicamente. Aunque también se puede llevar a cabo un mantenimiento generalizado de todos los componentes de la planta.
- Permite a la empresa contar con un historial de todos los equipos, además brinda la posibilidad de actualizar la información técnica de los equipos.
- Permite contar con un presupuesto aprobado por la directiva.

c) *Mantenimiento Predictivo*

Consiste en determinar en todo instante la condición técnica (mecánica y eléctrica) real de la máquina examinada, mientras esta se encuentre en pleno funcionamiento, para ello se hace uso de un programa sistemático de mediciones de los parámetros más importantes del equipo. El sustento tecnológico de este mantenimiento consiste en la aplicación de algoritmos matemáticos agregados a las operaciones de diagnóstico, que juntos pueden brindar información referente a las condiciones del equipo. Tiene como objetivo disminuir las paradas por mantenimientos preventivos, y de esta manera minimizar los costos por mantenimiento y por ausencia de producción.

La implementación de este tipo de métodos requiere de inversión en equipos, en instrumentos, y en contratación de personal calificado. Técnicas utilizadas para la estimación del mantenimiento predictivo:

- Analizadores de Fourier (para análisis de vibraciones)
- Endoscopia (para poder ver lugares ocultos)
- Ensayos no destructivos (a través de líquidos penetrantes, ultrasonido, radiografías, partículas magnéticas, entre otros)
- Termografía (detección de condiciones a través del calor desplegado)
- Medición de parámetros de operación (viscosidad, voltaje, corriente, potencia, presión, temperatura, etc.)

Para el mantenimiento preventivo el control es importante, porque asegura que los procedimientos de diagnóstico han sido bien aplicados, y que hay una mejora en el desempeño de los equipos. Además que es el control de mantenimiento preventivo y correctivo el que da origen a este tipo de mantenimiento.

7.2 MANTENIMIENTO DE LAS PLANTAS GEOTÉRMICAS

En una instalación geotérmica, y en especial en un sistema integrado de instalaciones, es de lo más conveniente contar con un esquema de mantenimiento preventivo cuidadosamente planeado. También es

recomendable contar con una existencia adecuada de repuestos, en lugares convenientes, en especial conjuntos completos de álabes de turbinas, tanto fijas como móviles, el mismo que permitirá reducir al mínimo los paros de la planta. En plantas como las de Landerello y Los Géiseres, cuentan con instalaciones donde trabaja un taller de maquinados en todas la plantas, esto se repite en las plantas geotérmicas mayores de todo el mundo, en el caso de tener reparaciones mayores, a veces es necesario enviar la planta descompuesta a la ciudad más cercana que tenga las facilidades requeridas, aunque raras veces se a adoptado tales pasos.

En el campo geotérmico Los Géiseres por ejemplo, se pueden realizar actividades como el balanceo de rotores de las turbinas y hacer los trabajos de álabes en la misma área del campo, y un taller de maquinado para hacer el mantenimiento a equipos de tamaño intermedio en el Centro Administrativo cercano al campo de los pozos, con proyecciones a construir un taller de maquinado completo.

7.2.1 DESCRIPCIÓN DE UN POSIBLE PLAN DE MANTENIMIENTO PARA CHACHIMBIRO

Por ejemplo en la planta Geotérmica Orzunil 1 se cuenta con un plan de mantenimiento que fue hecho estrictamente en base a las recomendaciones de los fabricantes de cada equipo, también ha ido evolucionado de forma que algunas tareas de mantenimiento se han aumentado y otras se han ido eliminando según la experiencia dentro de la planta lo ha ido indicando. Las tareas de mantenimiento se encuentran subdivididas en tres grandes áreas:

- Mantenimiento Mecánico
- Mantenimiento Eléctrico
- Mantenimiento de Instrumentación y control

Cada orden de trabajo de mantenimiento preventivo tiene su propia identificación, por ejemplo, digamos la re-calificación del transmisor de temperatura de la salida de la salmuera en la unidad siete, en donde dicha orden tendría la siguiente identificación:

OEC7 – TT1105 – CS

Donde:

OEC7, área de trabajo, unidad numero 7

TT1105, Nombre del equipo, transmisor de temperatura de la salida de salmuera.

CS, Departamento y Frecuencia:: Control semi-anual: semestral

Es de esta forma como se puede formar la nomenclatura de todas las órdenes de mantenimiento preventivo que conforman un plan de mantenimiento.

A continuación se va a indicar como se subdividen las áreas de trabajo:

- Unidades Generadoras
- Balance de la planta
 - Sistemas de recolección
 - Subestación
 - Equipos auxiliares

Existe una gran cantidad de formas de poder clasificar y codificar los equipos, muchas veces existen variaciones de industria a industria. Pero en un esfuerzo de unificar criterios en 1984 se unieron ISA (Sociedad americana de Instrumentación), y ANSI (American National Standards Institute), redactaron la norma ANSI/ISA 5.1 que regula la codificación y clasificación de equipos según se resume en la siguiente tabla 7.1.

Tabla 7.1 Letras de identificación

1era Letra		Letras sucesivas		
Variable Medida	Letra de Modificación	Función de letra pasiva	Función de salida	Letra de Modificación
A Análisis		Alarma		
B Llama (quemador)		Libre	Libre	Libre
C Conductividad			Control	
D Densidad o Peso específico	Diferencial			
E Tensión (fem)		Elemento primario		
F Caudal	Relación			
G Calibre				
H Manual				
I Corriente eléctrica		Indicación o indicador		
J Potencia	Exploración			
K Tiempo			Estación de control	
L Nivel		Luz piloto		
M Humedad				
N Libre		Libre	Libre	Libre
O Libre		Orificio		
P Presión		Punto de prueba		
Q Cantidad	Integración			
R Radioactividad		Registro		
S Velocidad o Frecuencia	Seguridad		Interruptor	
T Temperatura			Transmisión o transmisor	
U Multivariable		Multifunción	Multifunción	Multifunción
V Viscosidad			Válvula	
W Peso o fuerza		Vaina		
X Sin clasificar		Sin clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar
Y Libre			Relé o función	
Z Posición			Elemento final de control	

Es importante resaltar que si bien el lector no encuentra mucha relación en las letras y su significado es porque estas normas son hechas para letras en inglés y por lo tanto así se usan. Por ejemplo la letra F como primera letra se refiere a la variable Caudal porque (F = Flow = caudal), etc.

Otro ejemplo:

- LCV = letra primaria L (level, nivel), letra secundaria C (control), letra terciaria V (valve, válvula), LCV = Válvula de control de nivel = Level control valve

Además es muy importante identificar el Departamento y la Frecuencia con la cual es necesario realizar los mantenimientos, teniendo así:

- Departamentos
 - M (mechanical, mecánico)
 - E (electrical, eléctrico)
 - C (control, instrumentación y control)
- Frecuencia
 - Q (quarterly, trimestral)
 - S (semi annually, semestral)
 - A (annually, anual)
 - 24 (24 meses)
 - 36 (36 meses)
 - 60 (60 meses)

La programación de las tareas de mantenimiento es recomendable agruparlas por departamentos y frecuencias, distribuyéndolos en los diferentes meses del año de acuerdo al volumen de trabajo que hay en cada uno de ellos.

7.2.2 PROGRAMACIÓN

Las tareas de mantenimiento pueden encontrarse agrupadas por departamento y frecuencia. Se pueden distribuir, por ejemplo, en los diferentes meses del año de acuerdo al volumen de trabajo que hay en cada uno de ellos, en donde en la planta Orzunil 1 la carga de trabajo más fuerte es en el mes de febrero con las siguientes tareas de mantenimiento (Tabla 7.2):

Tabla 7.2. Planificación de Mantenimiento Preventivo mes de Febrero, planta Orzunil 1

Febrero		
Departamento y Frecuencia	Unidad	Cantidad de ordenes
MQ	2-4-6	69
ES	2-4-6	96
CS	2-4-6	138
MA	2-4-6	39
	Total	342

Lo cual significa que en el mes de Febrero se harán las órdenes de trabajo de mantenimiento preventivo mecánico trimestral en las unidades 2, 4 y 6, en total 69 órdenes, etc. El total de órdenes de trabajo preventivo del mes de Febrero fueron 342.

7.2.3 CONTROL DEL MANTENIMIENTO

Antiguamente el control del mantenimiento se lleva manualmente. Dentro de la planta existía un Analista de Planta, en quien se concentra todo el control del mantenimiento. Es la persona que gira todas las órdenes de mantenimiento preventivo y que recibe todas las órdenes de trabajo de mantenimiento correctivo, cuando estas ya han sido completadas.

A partir de estas órdenes se generaba un Reporte de trabajo, en donde se especifica cuál fue el problema que se encontró, acción correctiva, repuestos y costos implícitos. Todos estos reportes son analizados, y posteriormente sus resultados y modificaciones son incorporados nuevamente al plan de mantenimiento preventivo.

En la actualidad, se utilizan programas computacionales dedicados al control del mantenimiento. Siendo los más utilizados y populares SAP (SAP America Inc.), Maximo (MRO Software), y 7i (Datastream). Los mismos que permiten fácil y rápidamente crear una base de datos de las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo, optimizando de gran manera el tiempo de elaboración de los mismos.

7.3 MANTENIMIENTO DE LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL SISTEMA

Tabla 7.3. Mantenimiento de elementos constitutivos del sistema

Elemento	Información	Tipo de Mantenimiento	Acciones de Mantenimiento	Recomendaciones
Turbina de vapor	Durante su tiempo de trabajo, sufre desgastes de sus elementos y estos a su vez pueden provocar averías, por desajuste o por fatiga de los metales. Piezas mas comunes que deben tener mantenimiento: álabes, toberas, diafragma, rotor y válvulas de control	Preventivo	Se realizan cada 4 ó 5 años y según las recomendaciones del fabricante El periodo de mantenimiento depende principalmente de los parámetros iniciales del vapor y como consecuencia de la potencia Control visual constante del funcionamiento del equipo	Utilizar equipos más sofisticados para la detección de defectos en las turbinas que permiten diagnosticar con antelación su reparación. Utilizar un vapor de las características físico-químicas apropiadas. Respetar las instrucciones de operación en arranques, durante la marcha y durante las paradas del equipo. Realizar análisis periódicos y comprobar que la calidad del aceite, su presión, temperatura, y presencia de contaminantes está dentro de los márgenes adecuados. Respetar las consignas de protección del equipo (valores de alarma y disparo para cada uno de los parámetros controlados por el sistema de control). Si la turbina da algún síntoma de mal funcionamiento (vibraciones, temperaturas elevadas, falta de potencia, etc) parar y revisar el equipo: nunca sobrepasar los límites de determinados parámetros.
Separador de vapor	Son equipos de gran sencillez al no poseer partes móviles, y que apenas exigen mantenimiento	Preventivo	Control visual del funcionamiento del equipo periódicamente. Mantenimiento en la sección ocupada por el vapor, con el fin de evitar turbulencias	Evitar los excesos de energía del fluido a la entrada del recipiente. Monitoriar los sensores de nivel y presión a la salida del líquido. Cada recipiente debe contar con boquillas para inspección; para ciertas dimensiones la ASME exige bocas de visita (manholes).
Condensador	En condensadores barométricos el mantenimiento es mínimo, siempre y cuando se evite la corrosión en las tuberías	Preventivo	Limpieza anual de cañerías, si fuese necesario más seguido, donde se puede encontrar: barro, desechos, adherencias y otros sedimentos de la tubería del condensador que se acumulan durante el funcionamiento. Control visual del funcionamiento del equipo	Utilizar aleaciones de cobre para evitar la corrosión en los tubos. Evitar exponer al condensador a temperaturas bajo cero, para prevenir los daños por congelación de los tubos. Poner a circular una solución anticongelante a través del condensador y las tuberías de agua antes de drenar el sistema.
Torre de enfriamiento	Son equipos de gran sencillez y que apenas exigen mantenimiento	Preventivo	Lavar el interior de la cisterna, cuerpo y ducto de la torre con equipo de agua a presión. Realizar una limpieza mecánica. Revisión visual de motor y rodete.	Pintar todas las partes mecánicas sujetas a mojado, para evitar la corrosión. Revisar y lubricar constantemente los rodamientos del motor de la bomba. Minimizar la cantidad de suciedad aerotransportada cubriendo las aperturas de los ventiladores y persianas.
Tuberías	Necesitan de mucho cuidado para evitar principalmente el problema de corrosión en ellas.	Preventivo	Inspecciones técnica con equipo especial para detectar fisuras. Realizar pruebas de ultrasonido y radiografiado permanentes. Inspección visual permanente de tuberías y accesorios.	Utilizar uniones bridadas, con el permite el rápido montaje y desmontaje a objeto de realizar reparaciones o mantenimiento. Seleccionar el material adecuado que resista el medio corrosivo que actúa por el interior de la tubería o del ambiente que rodea exteriormente a la tubería Colocación de anclajes fijos en tramos mínimos de 100m ubicados en el terreno para prevenir la dilatación y la contracción térmica en la tubería.

Tabla 7.4. Mantenimiento de otros elementos del sistema

Elemento		Información	Tipo de Mantenimiento	Acciones de Mantenimiento	Recomendaciones
Otros elementos	Eyector	Mantenimiento es menos costoso y necesario que con extractores de gas, no necesita lubricación ni se desgasta	Preventivo	Inspección visual programada. Limpieza interior programada.	No necesita cimentación y puede ser sujetado conectado a las tuberías. Monitoreo programado de temperatura y presión en las bridas de succión y descarga.
	Limpiador de vapor	Poco mantenimiento	Preventivo	Inspección visual programada. Limpieza interior programada.	
	Tanque de recolección	Poco mantenimiento	Preventivo	Inspección visual programada. Limpieza interior programada.	Mantenimiento de los sensores para evitar inundaciones cuando se tenga que desechar el fluido
	Silenciador	Necesitan poco mantenimiento con una vida útil de 12 años	Preventivo	Inspección visual programada. Limpieza interior programada. Revisiones periódicas programadas.	Medir los niveles de ruido a la salida, para evitar contaminación
	Bomba	Si se siguen unas cuantas instrucciones al armar y desarmar la bomba se pueden economizar tiempo, trabajo y problemas. Tomando muy en cuenta las recomendaciones del fabricante	Preventivo	Revisiones periódicas programadas. Limpieza del filtro o rejillas situadas en la aspiración. Revisión periódica del buen funcionamiento de apertura y cierre de las válvulas asociadas con la bomba. Mantenimiento del motor eléctrico	No se necesitan equipos especiales de inspección. Si se presentan vibraciones de la bomba que exijan su reequilibrado. Comprobar y medir periódicamente sus características del aceite de funcionamiento de la bomba

7.4 SEGURIDAD EN LAS CENTRALES GEOTÉRMICAS

Al igual que todas las instalaciones en las cuales se utiliza fluidos de trabajo a altas temperaturas y presiones, una instalación geotérmica debe contar con los medios necesarios para proteger al personal contra lesiones y en general a la planta contra daños, bajo condiciones normales como en condiciones de urgencia.

A continuación se detallan algunas de las precauciones que se deben tomar en instalaciones geotérmicas:

a) Limitación de presión y vacío

A pesar de los discos de ruptura y las válvulas de seguridad que se instalan en los cabezales, protegen a todo el sistema de recolección y conducción del vapor, evitando presiones excesivas, estos no sirven para salvaguardar la planta y el equipo que se encuentra aguas abajo, los mismos que se encuentran diseñados para trabajar con presiones más bajas.

Por ejemplo, en Wairakei, las turbinas de contrapresión descargan a múltiples de presión más bajas, es imperiosamente necesario proteger a éstos por medio de válvulas de seguridad contra excesos de presión en el caso que se interrumpiera la descarga mientras continúa el influjo. En otro caso también se debe proteger a los múltiples que alimentan a las turbinas contra condiciones de vacío, evitando que las turbinas de condensación continúen succionado.

b) Arrastre de agua

A pesar de la utilización de válvulas de no retroceso de esfera, siempre se corre el riesgo de que alguna de ellas se encuentre defectuosa, produciendo que entre en forma intermitente grandes volúmenes de agua al sistema de tuberías de vapor. Por ningún motivo debe permitirse que ésta agua llegue a la planta de explotación, ya que las turbinas son particularmente vulnerables. Si el flujo del agua es moderado, las trampas de purga de la tubería serian necesarias, pero si es excesiva, se deben instalar un sistema reforzado de defensa con detectores de agua situados estratégicamente a intervalos a lo largo de las

tuberías troncales de vapor, el mismo que enviaría una señal a los operadores de la planta la mínima presencia de agua, desconectándose secuencialmente otros componentes más de la planta. Finalmente, si el agua llegara a un punto relativamente cercano a la entrada de la planta de explotación, debería ponerse fuera de operación toda la planta, a fin de detener completamente la corriente de vapor.

c) Detección de gases

La mayoría de los vapores geotérmicos contienen ácido sulfhídrico, aun en pequeñas proporciones, el mismo que se vuelve más peligroso por el hecho de que paraliza los nervios del olfato cuando se encuentra en una concentración relativamente alta. Como la densidad del H₂S es 18% mayor que la del aire a la misma temperatura, se acumula por lo general en bolsa en posición baja, ejemplo: sótanos de edificios, para lo cual es necesario que se encuentren ventiladas todas las trampas de gases posibles, aconsejándose además tomar muestras periódicamente de gas en todos los puntos de peligro potencial, y tal vez instalar detectores de gas acoplados a alarmas, además de limitar el tiempo permitido al personal en áreas peligrosas.

d) Sobrevelocidad

Las turbinas de vapor de centrales geotérmicas, se encuentra diseñadas para trabajar en condiciones de seguridad de sobrevelocidad de aproximadamente el 10% por encima de la velocidad sincrónica⁽³⁰⁾. Como se trabaja en un sistema mixto, pueden tener que trabajar en paralelo con turbina hidráulicas diseñadas para trabajar a velocidades hasta 40% mayores que la velocidad sincrónica. Cuando se pierda una gran proporción de carga, existe el peligro de una combinación sincronizada de las plantas geotérmicas, desboquen en velocidades peligrosas para la turbinas de vapor, es necesario dotarlas de una protección contra sobrevelocidad que dispare a la turbina cuando la planta geotérmica trate de arrastrarla a sobrevelocidades muy altas. Por ejemplo:

³⁰ Velocidad sincrónica.- de motor es definida por la velocidad de rotación del campo giratorio del estator, se mide en revoluciones por minuto (rpm),

en Wairakei esta precaución fue muy necesaria, debido a que predomina en forma importante la energía geotérmica.

e) Limitación de carga en tiempo de frío

Si se tiene una turbina de condensación completamente cargada durante todo el día, puede llegar a estar sobrecargada durante la noche, al descender la temperatura del agua de enfriamiento. Un dispositivo sensor de la carga puede proporcionar la protección necesaria.

7.5 FACTOR DE PLANTA ANUAL

La confiabilidad de los controles, el mantener un existencia adecuada de partes de repuesto, el seguimiento de un programa escrito de mantenimiento preventivo, junto con la confiabilidad inherente de los flujos de fluido térmico, deben asegurar un conjunto que las plantas generadoras geotérmicas alcancen factores de planta anuales mucho más altos que en cualquier otra forma de producir energía por medio de una planta generadora. El factor de planta generadoras geotérmicas se encuentra aproximadamente entre el 80 al 95%.

Tabla 7.5. Factores de planta en plantas geotérmicas

Planta Geotérmica	Factor de carga (%)
Wairakei (1975-1976), actualmente	98% 77%
Cerro Prieto (actualmente)	91%
Miravalles I, II,III (actualmente)	86%
Momotombo	85%
Géiseres (actualmente)	85 – 90%

Cálculo aproximado del factor de planta, de la central de 15 Mw

El factor de planta es una indicación de la utilización de la capacidad de la planta en el tiempo. Es el resultado de dividir la energía generada por la planta, en un periodo de tiempo dado (generalmente se toma anual), sobre la energía

que hubiera podido generar la planta si lo hiciera a plena carga durante todo el período.

Teniendo así:

- Planta de 15 MW
- Energía que hubiera podido generar la planta en un año si lo hiciera a plena carga

$$= 15 \text{ MW} * 365 \text{ días/año} * 24 \text{ horas/día} = 131400 \text{ MWh/año}$$

- Suponiendo que la planta, por mantenimiento en todo el año tuvo una para de 2 semanas, se tiene las cantidad de energía no producida:

$$= 15 \text{ MW} * 24 \text{ días} * 24 \text{ horas/día} = 8640 \text{ MWh/año}$$

- Suponiendo que la planta en un año hubiera generado 122760 MWh/año, entonces el factor de planta sería:

$$FP = (122760 \text{ MWh} / 1314000 \text{ MWh}) * 100\% = 93\%$$

CAPITULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENCACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- Se realizó el estudio de factibilidad para la implementación de una Central Geotérmica de 15 Mw en la zona de Chachimbiro con los parámetros técnicos y económicos donde se sustenten los principios de este proyecto y afines.
- Para poder realizar este estudio se aplicó los conocimientos adquiridos en el tiempo de estudio en la ESPE, en su mayoría estudios de las áreas de termodinámica, hidrodinámica, planeación y evolución de proyectos, entre otras.
- Se contribuyó al estudio e investigación de nuevas alternativas de generación eléctrica por medio de energías no convencionales, dejando una base de información muy grande de energía geotérmica con respecto a lo que se puede hacer en el país, ya que antes de la realización de este trabajo, solo existía información muy primaria y prácticamente nula en cuanto al proceso y los elementos que componen a esta fuente de energía.
- Se realizó un estudio de factibilidad operativa, técnica y económica de los equipos y materiales que intervienen en el funcionamiento del sistema escogido para una central geotérmica de 15 Mw en la zona de Chachimbiro, con lo cual se puede dar a conocer una base de resultados eficientes y lo más apegados a la realidad para quienes quieran realizar estudios mas detallados sobre cada uno de los temas tratados y tengan con que comparar estos de una manera cualitativa y cuantitativa.
- Al culminar con la realización del la Factibilidad Operacional (Capítulo 4), se llevo a obtener una Central de tipo Doble Flash, ya que este aportaba con aproximadamente 20% adicional de producción de energía con respecto a

una Central de tipo Simple Flash, debido básicamente al incremento de caudal que ingresa a la segunda etapa de la turbina.

- Con un caudal de 180 Kg/s que se estimo que provenían de 3 pozos productores, se generaron 17 Mw y 5 Mw de potencia máxima y mínima respectivamente, cumpliendo con la meta principal de nuestro proyecto de generar alrededor de 15 Mw en la central.
- Al culminar con la realización de la Factibilidad Técnica (Capítulo 5) se logro identificar los elementos principales que conforma una central de doble flash, su funcionamiento, selección, principales formas de mantenimiento; logrando de esta manera obtener un análisis muy aproximado de cada uno de estos.

8.2 RECOMENDACIONES

- Antes de realizar un explotación del recurso geotérmico en Chachimbiro consideramos que se deben poner en consenso y ser estudiados problemas sociales que pueden hacer peligrar el proyecto, estos son problemas que han aparecido en los últimos 15 años con los terribles gobiernos que han ocupado cargos, han salido y han sido derrocados por sus constante síntomas y manifestaciones de corrupción y falta de liderazgo. Estos problemas no se los trata muchas veces a la hora de elegir o dar viabilidad a un proyecto, entre los cuales el que mas se destaca: es que la zona de Chachimbiro es una zona que contienen poblados pequeños pero de gran unión política entre ellos y si seguimos la regla revolucionaria de los pueblos indígenas, cuando la central geotérmica se quiera realizar, ellos darán mucho problemas, además se ha visto en estos últimos años en el país que los pueblos indígenas quieren tomar el liderazgo a base de confrontamientos con los demás poderes políticos, con lo cual la Central en Chachimbiro por su fácil acceso , su corta distancia hacia los poblados

hacen y ponen a dicha central como un lugar estratégico para su toma y paralización de sus trabajos en paros, revueltas y demás.

- Otra situación que nos preocupa mucho es la parte medio ambiental de la zona de Chachimbiro, esta es una zona erosionada con muchas quebradas y según lo que hemos puesto a consideración en este trabajo las centrales geotérmicas erosionan el suelo mucho más de lo realizado por la naturaleza y en zonas con muchas quebradas no siempre es aconsejable construirlas por los problemas de deslaves y movimiento telúricos. Por ello el estudio medioambiental de la zona debe ser exhaustivo sin dejar el menor margen de error ya que dicha zona se encuentra circundada de una geografía muy variable. Hay zonas como Chalupas donde no se tiene poblados cercanos, son pantanos con poca vida donde la erosión sería menor y que podrían tomarse en cuenta para su estudio, pero claro uno de los inconvenientes de esta zona es el no constar con un acceso fácil.

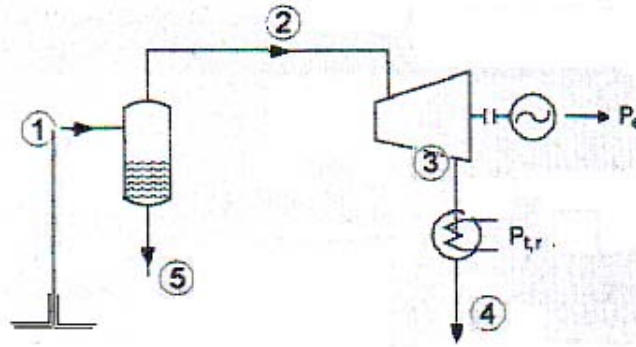
ANEXOS

ANEXO 1

Memoria de cálculo (cajas negras) del ciclo de simple y doble flashing.

Ejemplo comparativo para la toma de decisión del sistema a utilizar entre los casos de flashing:

CENTRAL DE FLASH SIMPLE



Esquema básico para una central geotérmica con proceso de simple flash

CARACTERISTICAS INICIALES EN BOCA DE POZO

De acuerdo con las características iniciales descritas en el punto 4.1, tabla 4.4 (Características iniciales del proyecto), se tomaron como referencia los siguientes valores a manera de ejemplo, vale recalcar que para este ejemplo no se consideran pérdida de calor y presión en las tuberías y el caudal usado es un valor mínimo de simple comparación:

Titulación: $x := 0.25$ Presión: $P1 := 10 \text{ bar abs}$ $Q_{total} := 1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

CARACTERISTICAS EN PUNTO "1"

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una presión $P1 = 10 \text{ bar abs}$ y su respectiva temperatura de saturación, se tiene:

Temperatura de saturación:

$$T1 := 179.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entalpía de vapor saturado:

$$h1v := 2778.1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Entalpía de líquido saturado:

$$h1l := 762.81 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

(*Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876*)

La entalpía a boca de pozo (h_m), utilizando la formula de entalpías en función de la titulación, vendrá dada por:

$$h_m := x \cdot h_{1v} + (1 - x) \cdot h_{1l}$$

$$h_m = 1266.63 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Energía Geotérmica Jaime Pous [2]

CARACTERISTICAS EN PUNTO "2"

En este punto, el fluido se encuentra en un estado de vapor, a las mismas condiciones que en el punto "1", cuando se tiene un cálculo ideal, donde tenemos:

$$\begin{array}{lll} h_{2v} := h_{1v} & P_2 := P_1 & T_2 := T_1 \\ h_{2v} = 2778.1 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} & P_2 = 10 \quad \text{bar abs} & T_2 = 179.9 \quad ^\circ\text{C} \end{array}$$

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una presión $P_1=10$ bar abs y su respectiva temperatura de saturación, se tiene:

Entropía de vapor saturado:

$$s_2 := 6.5865 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

(*Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876*)

CARACTERISTICAS EN EL PUNTO "3" (teóricas supuestas)

De acuerdo con las características iniciales descritas en el punto 4.1, tabla 4.4 (Características iniciales del proyecto), se tomo como referencia el siguiente valor:

Temperatura a la salida de la segunda etapa de la turbina:

$$T_3 := 40 \quad ^\circ\text{C}$$

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una temperatura $T_3=40\text{ }^\circ\text{C}$, se tiene:

Entalpía de vapor saturado:

$$h_{3v} := 2574.3 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Entalpía de líquido saturado:

$$h_{3l} := 167.57 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Entropía de vapor saturado:

$$s_{3v} := 8.257 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}$$

Entropía de líquido saturado:

$$s_{3l} := 0.572 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}$$

Presión de saturación:

$$P_3 := 0.0738 \text{ bar abs}$$

CARACTERISTICAS EN PUNTO "5"

En este punto, la presión y la temperatura son las mismas que el punto "1", teniendo así:

$$P_5 := P_1$$

$$T_5 := T_1$$

$$P_5 = 10 \text{ bar abs}$$

$$T_5 = 179.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una presión $P_6=10$ bar abs y su respectiva temperatura de saturación, se tiene:

Entalpía de líquido saturado:

$$h_{5l} := 762.81 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Entropía de líquido saturado:

$$s_{5l} := 2.138 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}$$

(Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876)

CALCULO DE LA CARACTERISTICAS DEL PUNTO "3"

Si la expansión fuera isentrópica, el estado de vapor a la salida de la turbina sería:

$$s_{3isen} := s_2$$

$$s_{3isen} = 6.587 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}$$

Utilizando la fórmula del título de la mezcla en función de las entropías, el título de mezcla en este punto vendrá dada por:

$$x_{3\text{isen}} := \frac{s_{3\text{isen}} - s_{3l}}{s_{3v} - s_{3l}}$$

$$x_{3\text{isen}} = 0.783$$

Energía Geotérmica Jaime Pous [2]

Y la entalpía al final del proceso isentrópica, utilizando la fórmula del título de mezcla en función de las entalpías, será:

$$h_{3\text{isen}} := h_{3l} \cdot (1 - x_{3\text{isen}}) + h_{3v} \cdot x_{3\text{isen}}$$

$$h_{3\text{isen}} = 2051.15 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Energía Geotérmica Jaime Pous [2]

Como el proceso es adiabático no isentrópica, y usando una eficiencia de turbina del 70% tomado como promedio de las tablas 4.2, 4.3 y 4.4, se tiene:

$$\eta_i := 0.7$$

$$h_3 := h_{2v} - \eta_i \cdot (h_{2v} - h_{3\text{isen}})$$

$$h_3 = 2269.23 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Y el título de mezcla real será:

$$x_3 := \frac{h_3 - h_{3l}}{h_{3v} - h_{3l}}$$

$$x_3 = 0.873$$

Energía Geotérmica Jaime Pous [2]

CARACTERÍSTICAS EN EL PUNTO "4"

En este punto, la presión, temperatura y características son las mismas que el punto "3", teniendo así:

$$P_4 := P_3 \qquad T_4 := T_3$$

$$P_4 = 0.074 \text{ bar abs} \qquad T_4 = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h4 := h31 \qquad s4 := s31$$

$$h4 = 167.57 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \qquad s4 = 0.572 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

CALCULO DE LA POTENCIA INTERNA

Valores asumidos de eficiencias:

Eficiencia Mecánica	Eficiencia Eléctrica
$\eta_m := 0.85$	$\eta_e := 0.9$

Promedios de los valores obtenidos de las tablas 4.1, 4.2 y 4.3

Potencia eléctrica generada en los bornes:

$$P_{gen} := Q_{total} \cdot [x \cdot (h_{2v} - h_3)] \cdot (\eta_m \cdot \eta_e)$$

$$P_{gen} = 97.321 \quad \text{KW}$$

Potencia de consumo propio de la planta:

Se asume un valor referencial de consumo de energía que podría tener una central geotérmica de similares características, así:

$$P_{consu} := P_{gen} \cdot 0.1$$

$$P_{consu} = 9.732 \quad \text{KW}$$

Consumo promedio ver tablas 4.1, 4.3

Potencia eléctrica neta:

$$P_{neta} := P_{gen} + P_{consu}$$

$$P_{neta} = 107.053 \quad \text{KW}$$

CALCULO DE LOS CAUDALES EN CADA SECCION

$Q_2 := x \cdot Q_{total}$	$Q_6 := (1 - x) \cdot Q_{total}$	$Q_4 := Q_2$
$Q_2 = 0.25 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$	$Q_6 = 0.75 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$	$Q_4 = 0.25 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$

CALCULO DEL CONSUMO ESPECÍFICO BRUTO

$$\text{Conespe} := \frac{x \cdot Q_{\text{total}} \cdot 3600}{P_{\text{neto}}}$$

$$\text{Conespe} = 8.407 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{KW} \cdot \text{h}}$$

Energía Geotérmica Jaime Pous[2] (transformación de segundos a hora, y MW a KW)

EFICIENCIA TERMICA

Ciclo cerrado

$$\eta_{\text{tc}} := \frac{[x \cdot (h_{2v} - h_3)]}{[h_m - [(1 - x) \cdot h_{5l} + x \cdot h_4]}$$

$$\eta_{\text{tc}} = 0.195$$

$$\eta_{\text{tc}\%} := \eta_{\text{tc}} \cdot 100$$

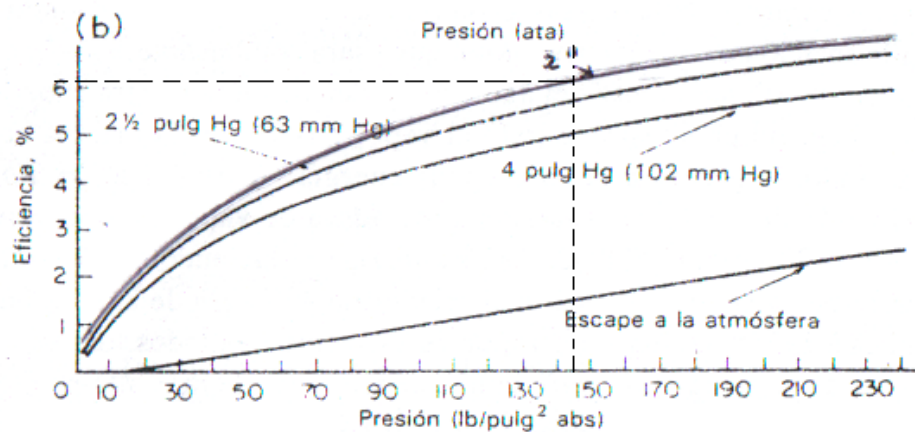
$$\eta_{\text{tc}\%} = 19.493 \%$$

Energía Geotérmica Jaime Pous[2]

Ciclo abierto

Usando la figura 10.5 b) para vaporización sencilla de eficiencia típicas de generación geotérmica

Geothermal energy by H. Christopher H. Armstead, 1989, Editorial Limusa S.A. página 240).



- En el eje (x) con una presión equivalente a 10 bar abs aproximadamente 147 lb/plg² abs
- La salida de la turbina se da a 2 plg de Hg abs eso a los 40 °C en el condensador.
- Con lo que obtenemos en el eje “y” el valor de 6.1% de eficiencia

Resultados obtenidos en el proceso de simple flash

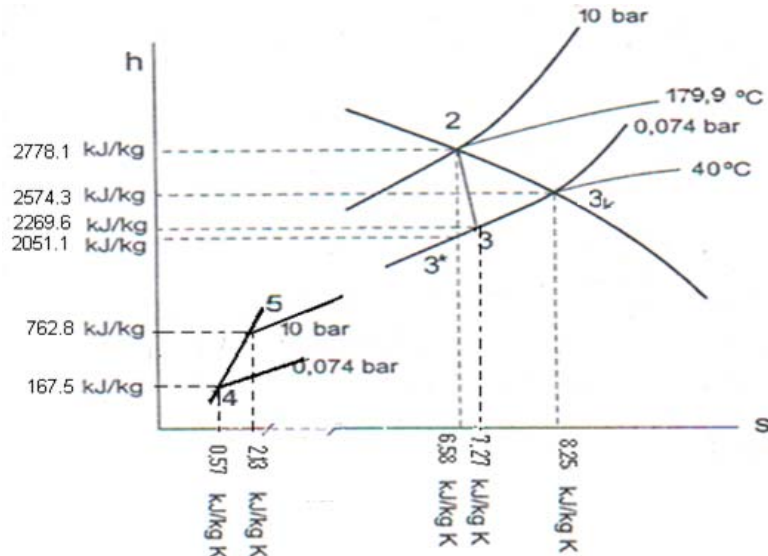


Figura A1.2 Representación del ciclo de vapor sobre un diagrama entalpia-entropía de simple flash

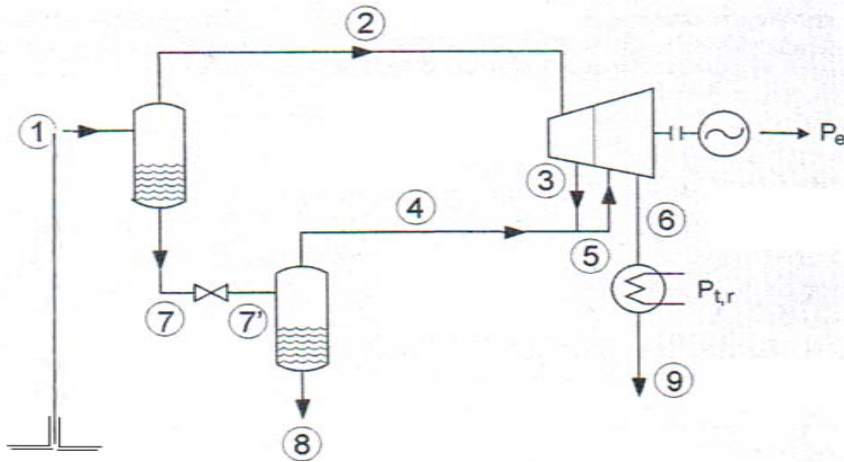
Tabla A1.1 Valores en cada uno de los puntos que intervienen en el proceso

PUNTO	PRESION (bar)	TEMPERATURA (°C)	ENTALPIA (kJ/kg)	ENTROPIA (kJ/kg K)	CAUDAL (kg/s)	TIPO DE FLUIDO
1	10	179.9	1266.66		1	Vapor húmedo 0.25
2	10	179.9	2778.1	6.586	0.25	Vapor seco
3	0.074	40	2269.63	7.27	0.25	Vapor húmedo 0.87
3*	0.074	40	2051.15	6.587	0.25	Vapor húmedo 0.78
4	0.074	40	167.57	0.572	0.25	Agua líquida
5	10	179.9	762.81	2.138	0.75	Agua líquida

Tabla A1.2 de resultados del proceso

Potencia consumida (kw)	Esta es una aproximación de 10% de lo generado			
Potencia neta (kw)	107.53			
Potencia interna en la turbina (kw)	$\eta_i = 0.70$	$\eta_m = 0.85$	$\eta_e = 0.90$	P generada: 97
Consumo específico vapor (kg/h kw)	8.45			
Eficiencia térmica (ciclo cerrado)	19.5%			
Eficiencia térmica (ciclo abierto)	6.1%			

CENTRAL DE FLASH DOBLE



Esquema básico para una central geotérmica con proceso de doble flash

CARACTERÍSTICAS INICIALES EN BOCA DE POZO

De acuerdo con las características iniciales descritas en el punto 4.1, tabla 4.4 (Características iniciales del proyecto), se tomaron como referencia los siguientes valores a manera de ejemplo, vale recalcar que para este ejemplo no se consideran pérdida de calor y presión en las tuberías y el caudal usado es un valor mínimo de simple comparación:

Titulación: $x := 0.25$ Presión: $P_1 := 10 \text{ bar abs}$ $Q_{\text{total}} := 1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

CARACTERÍSTICAS EN PUNTO "1"

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una presión $P_1 = 10 \text{ bar abs}$ y su respectiva temperatura de saturación, se tiene:

Temperatura de saturación:

$$T_1 := 179.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entalpía de vapor saturado:

$$h_{1v} := 2778.1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Entalpía de líquido saturado:

$$h_{1l} := 762.81 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

(*Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876*)

La entalpía a boca de pozo (h_m), utilizando la formula de entalpías en función de la titulación, vendrá dada por:

$$h_m := x \cdot h_{1v} + (1 - x) \cdot h_{1l}$$

$$h_m = 1266.63 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Condiciones de Flash 1

CARACTERISTICAS EN PUNTO "2"

En este punto, el fluido se encuentra en un estado de vapor, a las mismas condiciones que en el punto "1", cuando se tiene un cálculo ideal, donde tenemos:

$$h_2 := h_{1v}$$

$$P_2 := P_1$$

$$T_2 := T_1$$

$$h_2 = 2778.1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$P_2 = 10 \text{ bar abs}$$

$$T_2 = 179.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una presión $P_1=10$ bar abs y su respectiva temperatura de saturación, se tiene:

Entropía de vapor saturado:

$$s_2 := 6.5865 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

(*Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876*)

Condiciones de Flash 2

CARACTERISTICAS EN PUNTO "4"

De acuerdo con las características iniciales descritas en el punto 4.1, tabla 4.3 (Características iniciales del proyecto), se toma como referencia el siguiente valor:

$$P_4 := 1.5 \text{ bar abs}$$

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una presión $P_4 = 1.5$ bar, se tiene:

Temperatura de saturación:

$$T_4 := 111.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Entalpía de vapor saturado:

$$h_4 := 2693.4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Entropía de vapor saturado:

$$s_4 := 7.233 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

(*Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876*)

CARACTERISTICAS EN PUNTO "8"

En este punto, la presión y la temperatura son las mismas que el punto "4",
teniendo así:

$$P8 := P4$$

$$T8 := T4$$

$$P8 = 1.5 \text{ bar abs}$$

$$T8 = 111.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una presión $P4 = 1.5$
bar abs, se tiene:

Entalpía de líquido saturado:

Entropía de líquido saturado:

$$h8 := 467.1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$s8 := 1.434 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}$$

(*Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876*)

CARACTERISTICAS EN PUNTO "3"

Si la expansión fuera isentrópica, el estado de vapor a la salida de la turbina sería:

$$s_{3\text{isen}} := s2$$

$$s_{3\text{isen}} = 6.587 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}$$

Utilizando la fórmula del título de la mezcla en función de las entropías, el título de
mezcla en este punto vendrá dada por:

$$x_{3\text{isen}} := \frac{s_{3\text{isen}} - s8}{s4 - s8}$$

$$x_{3\text{isen}} = 0.889$$

Energía Geotérmica Jaime Pous,[2]

Y la entalpía al final del proceso isentrópico, utilizando la fórmula del título de
mezcla en función de las entalpías, será:

$$h_{3\text{isen}} := h_8 \cdot (1 - x_{3\text{isen}}) + h_4 \cdot x_{3\text{isen}}$$

$$h_{3\text{isen}} = 2445.2 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Energía Geotérmica Jaume Pous, [2]

Como el proceso es adiabático no isentrópica, y usando una eficiencia de turbina del 70% tomado como promedio de las tablas 4.2, 4.3 y 4.4, se tiene:

$$\eta_i := 0.7$$

$$h_3 := h_2 - \eta_i \cdot (h_2 - h_{3\text{isen}})$$

$$h_3 = 2545.07 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Y el título de mezcla real será:

$$x_3 := \frac{h_3 - h_8}{h_4 - h_8}$$

$$x_3 = 0.933$$

Energía Geotérmica Jaume Pous [2]

En este punto, la presión y la temperatura son las mismas que el punto "4", teniendo así:

$$\begin{array}{ll} T_3 := T_4 & P_3 := P_4 \\ T_3 = 111.7 \text{ } ^\circ\text{C} & P_3 = 1.5 \text{ bar abs} \end{array}$$

CARACTERISTICAS EN PUNTO "7"

En este punto, la presión y la temperatura son las mismas que el punto "1", teniendo así:

$$\begin{array}{ll} P_7 := P_1 & T_7 := T_1 \\ P_7 = 10 \text{ bar abs} & T_7 = 179.9 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array}$$

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una presión $P_7 = 10$ bar y su respectiva temperatura de saturación, se tiene:

Entalpía de líquido saturado:

$$h7 := h_{11}$$

$$h7 = 762.81 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

(*Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876*)

Y utilizando la fórmula del título de mezcla en función de las entalpías, se tiene:

$$x7 := \frac{h7 - h8}{h4 - h8}$$

$$x7 = 0.133$$

Energía Geotermica Jaume Pous,[2]

CARACTERÍSTICAS EN PUNTO " 7 "

Son las mismas que en el punto "7", para este primer cálculo ideal, teniendo así:

$$P7' := P7$$

$$T7' := T7$$

$$h7' := h7$$

$$x7' := x7$$

$$P7' = 10 \text{ bar}$$

$$T7' = 179.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h7' = 762.81 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$x7' = 0.133$$

CARACTERISTICAS EN EL PUNTO "5"

Como el caudal que se tiene dentro la primera etapa de la turbina, se junta con el procedente de la segunda cámara de flash, se tiene el caudal de entrada en la segunda etapa. Estos serán expresados en función del caudal total, y así de esta manera poder determinar el valor de la entalpía, teniendo así:

Variables utilizadas:

"Z": corresponde a la fracción de caudal en el punto "4"

$$z := x7' \cdot (1 - x)$$

" Y ": corresponde a la fracción de caudal en el punto "5"

$$y := x + z$$

Ya identificadas la variables y utilizando la formulas de entalpías en función del caudal, el valor de la entalpía vendrá dada por:

$$h5 := \frac{x \cdot h3 + z \cdot h4}{y}$$

$$h5 = 2587.34 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Energía Geotérmica Jaume Pous, [2]

Y por consiguiente, el valor del título de la mezcla, utilizando la fórmula de la misma en función de las entalpías, será:

$$x5 := \frac{h5 - h8}{h4 - h8}$$

$$x5 = 0.952$$

Energía Geotérmica Jaume Pous, [2]

Utilizando la fórmula del título de la mezcla en función de la entropía, se tiene:

$$s5 := x5 \cdot s4 + (1 - x5) \cdot s8$$

$$s5 = 6.957 \frac{\text{KJ}}{\text{KgK}}$$

Energía Geotérmica Jaume Pous, [2]

En este punto, la presión y la temperatura son las mismas que el punto "4", teniendo así:

$$T5 := T4$$

$$P5 := P4$$

$$T5 = 111.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P5 = 1.5 \text{ bar abs}$$

CARACTERISTICAS EN EL PUNTO "9"

De acuerdo con las características iniciales descritas en el punto 4.1 (Características iniciales del proyecto), se tomo como referencia el siguiente valor:

Temperatura a la salida de la segunda etapa de la turbina:

$$T9 := 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una temperatura T9 = 40 °C, se tiene:

Entalpía de vapor saturado:

$$h_{9v} := 2574.4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Entalpía de líquido saturado:

$$h_{9l} := 167.5 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Entropía de vapor saturado:

$$s_{9v} := 8.258 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

Entropía de líquido saturado:

$$s_{9l} := 0.572 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

Presión de saturación:

$$P_9 := 0.074 \text{ bar abs}$$

(*Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876*)

CARACTERISTICAS EN EL PUNTO "6"

Si la expansión fuera isentrópica, el estado de vapor a la salida de la turbina sería:

$$s_{6isen} := s_5$$

$$s_{6isen} = 6.957 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

Utilizando la fórmula del título de la mezcla en función de las entropías, el título de mezcla en este punto vendrá dada por:

$$x_{6isen} := \frac{s_{6isen} - s_{9l}}{s_{9v} - s_{9l}}$$

$$x_{6isen} = 0.831$$

Energía Geotérmica Jaime Pous, [2]

Y la entalpía al final del proceso isentrópico, utilizando la fórmula del título de mezcla en función de las entalpías, será:

$$h_{6isen} := h_{9l} \cdot (1 - x_{6isen}) + h_{9v} \cdot x_{6isen}$$

$$h_{6isen} = 2166.9 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Energía Geotérmica Jaime Pous, [2]

Como el proceso es adiabático no isentrópico, y usando una eficiencia de turbina del 70%, tomado como promedio de las tablas 4.1, 4.2 y 4.3, se tiene:

$$\eta_i := 0.7$$

$$h_6 := h_5 - \eta_i \cdot (h_5 - h_{6isen})$$

$$h_6 = 2293.03 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Energia Geotérmica Jaume Pous [2]

Y el título de mezcla real será:

$$x_6 := \frac{h_6 - h_{9l}}{h_{9v} - h_{9l}}$$

$$x_6 = 0.883$$

Energia Geotérmica Jaume Pous [2]

En este punto, la presión y la temperatura son las mismas que el punto "9",
teniendo así:

$$T_6 := T_9$$

$$P_6 := P_9$$

$$T_6 = 40 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_6 = 0.074 \quad \text{bar abs}$$

CALCULO DE LA POTENCIA INTERNA

Valores asumidos de eficiencias:

Eficiencia Mecánica

Eficiencia Eléctrica

$$\eta_m := 0.85$$

$$\eta_e := 0.9$$

Promedios de los valores obtenidos de las tablas 4.1, 4.2 y 4.3

$$P_{gen} := [x \cdot (h_2 - h_3) + y \cdot (h_5 - h_6)] \cdot \eta_e$$

$$P_{gen} = 145.036 \quad \text{KW}$$

Potencia de consumo propio de la planta:

Se asume un valor referencial de consumo de energía que podría tener una
central geotérmica de similares características, teniendo así:

$$P_{consu} := P_{gen} \cdot 0.1$$

$$P_{consu} = 14.504 \quad \text{KW}$$

Consumo promedio ver tabla 4.1

Potencia eléctrica generada:

$$P_{neta} := P_{gen} + P_{consu}$$

$$P_{neta} = 159.54 \quad \text{KW}$$

CALCULO DE LOS CAUDALES:

$$Q_2 := x \cdot Q_{total}$$

$$Q_2 = 0.25 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$Q_3 := Q_2$$

$$Q_3 = 0.25 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$Q_7 := (1 - x) \cdot Q_{total}$$

$$Q_7 = 0.75 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$Q_7' := Q_7$$

$$Q_7' = 0.75 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$Q_4 := x_7' \cdot Q_7$$

$$Q_4 = 0.1 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$Q_8 := Q_7 - Q_4$$

$$Q_8 = 0.65 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$Q_5 := Q_2 + Q_4$$

$$Q_5 = 0.35 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$Q_6 := Q_5$$

$$Q_6 = 0.35 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$Q_9 := Q_6$$

$$Q_9 = 0.35 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

CALCULO DEL CONSUMO ESPECÍFICO BRUTO

$$\text{Conespe} := \frac{0.25 Q_{total} \cdot 3600}{P_{gen}}$$

$$\text{Conespe} = 6.21 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{KW} \cdot \text{h}}$$

Energía Geotérmica Jaime Pous[2] (transformación de segundos a hora, y MW a KW)

EFICIENCIA TERMICA

Ciclo cerrado

$$\eta_{tc} := \frac{[x \cdot (h_2 - h_3)] + y \cdot (h_5 - h_6)}{[h_m - [(1 - y) \cdot h_8 + y \cdot h_9]]}$$

$$\eta_{tc} = 0.178$$

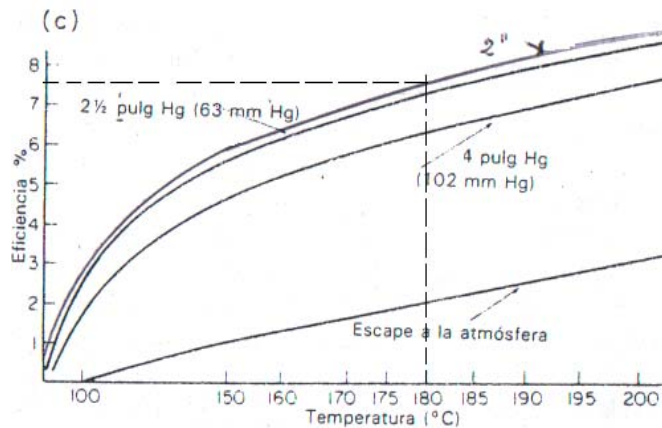
$$\eta_{tc\%} := \eta_{tc} \cdot 100$$

$$\eta_{tc\%} = 17.821 \quad \%$$

Ciclo abierto

Usando la figura 10.5 b) para vaporización sencilla de eficiencia típicas de generación geotérmica

Geothermal energy by H. Christopher H. Armstead, 1989, Editorial Limusa S.A. página 240).



- En el eje (x) con una temperatura de 179.9 equivalente a 10 bar abs.
- La salida de la turbina se da a 2 plg de Hg abs eso a los 40 grados centígrados en el condensador.
- Con lo que obtenemos en el eje y el valor de 7.5% de eficiencia.

Resultados obtenidos en el proceso de doble flash

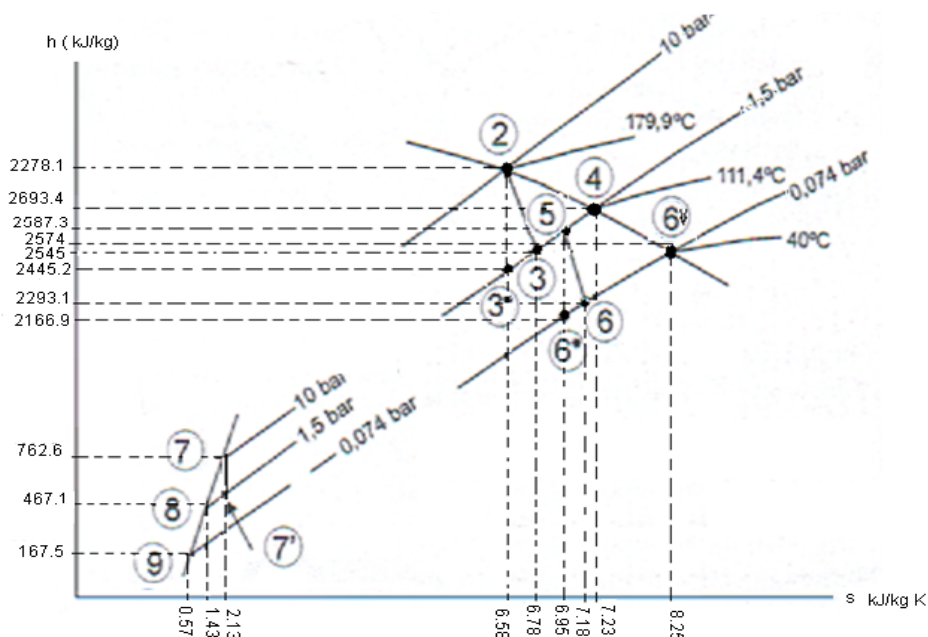


Figura A1.4 Representación del ciclo de vapor sobre un diagrama entalpía-entropía de doble flash

Tabla A1.3 Valores en cada uno de los puntos que intervienen en el proceso

PUNTO	PRESION (bar)	TEMPERATURA (°C)	ENTALPIA (kJ/kg)	ENTROPIA (kJ/kg K)	CAUDAL (kg/s)	TIPO DE FLUIDO
1	10	179.9	1266.6		1	Vapor húmedo 0.25
2	10	179.9	2778.1	6.58	0.25	Vapor seco
3	1.5	111.4	2545.07	6.78	0.25	Vapor húmedo 0.93
3'	1.5	111.4	2445.2	6.58	0.25	Vapor húmedo 0.89
4	1.5	111.4	2693.4	7.23	0.10	Vapor seco
5	1.5	111.4	2587.3	6.95	0.35	Vapor húmedo 0.95
6	0.074	40	2293.1	7.10	0.35	Vapor húmedo 0.88
6'	0.074	40	2166.9	6.95	0.35	Vapor húmedo 0.83
7	10	179.9	762.6	2.13	0.75	Agua líquida
7'	1.5	111.4	762.8	2.13	0.75	Vapor húmedo 0.13
8	1.5	111.4	467.1	1.43	0.75	Agua líquida
9	0.074	40	167.5	0.57	0.35	Agua líquida

Tabla A1.4 Resultados del proceso

Potencia consumida (kw)	Esta es una aproximación de 10% de la potencia generada			
Potencia neta (kw)	159.54			
Potencia interna en la turbina (kw)	$\eta_i = 0.70$	$\eta_m = 0.85$	$\eta_e = 0.90$	$P_{\text{generado}} = 145$
Consumo específico vapor (kg/h kw)	6.21			
Eficiencia térmica (ciclo cerrado)	18%			
Eficiencia térmica (ciclo abierto)	7.5%			

ANEXO 2

Memoria de cálculo del sistema seleccionado

CARACTERISTICAS EN PUNTO (2)

El separador de vapor se lo colocara lo más cerca posible de la central generadora, para no tener problemas con la excesiva condensación del vapor antes de llegar a la turbina, esto equivale a un 20% de perdidas ver 4.3, 5.2, 5.5.1 (ver calculo de caídas de presión)

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una presión $P_2 = 8$ bar abs y su respectiva temperatura de saturación, se tiene:

$$T_2 := 170.43 \text{ } ^\circ\text{C} \quad P_2 := 8 \text{ bar abs}$$

Entalpía de vapor saturado: Entalpía de líquido saturado:

$$h_{2v} := 2769.1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \quad h_{2l} := 721.11 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Entalpía de vapor saturado: Entalpía de líquido saturado:

$$s_{2v} := 6.6628 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}\cdot\text{K}} \quad s_{2l} := 2.0462 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}$$

(*Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876*)

La entalpía al llegar al separador 1 (hm), utilizando la formula de entalpías en función de la titulación, vendrá dada por:

$$h_m := x \cdot h_{2v} + (1 - x) \cdot h_{2l}$$

$$h_m = 1233.11 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

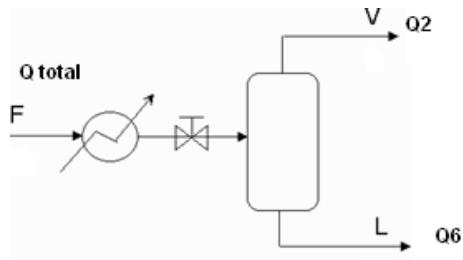
$$s_m := x \cdot s_{2v} + (1 - x) \cdot s_{2l}$$

$$s_m = 3.2 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}$$

Energía Geotérmica Jaime Pous [2]

Condiciones de Flash 1

En el separador siguiendo el balance energético de la sección 5.2.2 tenemos:



Eficiencia del separador 95% ver sección 5.2:

$$\eta_{S1} := 0.95$$

$$Q2 := x \cdot Q_{total} \cdot \eta_{S1}$$

$$Q2 = 42.7 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

El 5% que no se logró separar, se deberá remover por medio de purgas antes de que llegue el vapor a la turbina en su primera etapa

$$Q6 := Q_{total} - [Q2 + (1 - \eta_{S1}) \cdot Q2]$$

$$Q6 = 135.11 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

CARACTERISTICAS EN PUNTO (3)

Entre el punto 2 al 3 ingreso a la turbina se tendrá un porcentaje de caída de presión de 5% (ver caídas de presión en tuberías)

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una presión $P2 = 7.5$ bar y su respectiva temperatura de saturación, se tiene:

$$h_{3v} := 2766.4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \quad P3 := 7.5 \text{ bar abs} \quad T3 := 167.78^\circ\text{C}$$

Entropía de vapor saturado:

$$s_{3v} := 6.6847 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \quad Q3 := Q2$$

$$Q3 = 42.75 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

(*Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876*)

CARACTERISTICAS EN PUNTO (4)

De acuerdo con las características iniciales descritas en el punto 4.1, detalle tabla 4.3 (Características iniciales del proyecto), se tomo como referencia el siguiente valor de la presión al terminar la primera etapa de turbina:

$$P4 := 1.5 \text{ bar abs}$$

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una presión $P4 = 1.5 \text{ bar abs}$, se tiene:

Temperatura de saturación: Entalpía de vapor saturado: Entropía de vapor saturado:

$$T4 := 111.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{4v} := 2693.4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$s_{4v} := 7.233 \frac{\text{KJ}}{\text{KgK}}$$

(*Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876*)

CARACTERISTICAS EN PUNTO (5)

En este punto, la presión y la temperatura son las mismas que el punto "4", teniendo así:

$$P5 := P4$$

$$T5 := T4$$

$$P5 = 1.5 \text{ bar abs}$$

$$T5 = 111.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una presión $P5 = 1.5 \text{ bar abs}$, se tiene:

Entalpía de líquido saturado:

$$h5 := 467.1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Entropía de líquido saturado:

$$s5 := 1.434 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}$$

(*Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876*)

CARACTERISTICAS EN PUNTO (1E)

En este punto, la presión y la temperatura son las mismas que el punto "4", teniendo así:

$$\begin{aligned}T1E &:= T4 & P1E &:= P4 \\ T1E &= 111.7^{\circ}\text{C} & P1E &= 1.5 \text{ bar abs}\end{aligned}$$

Si la expansión fuera isentrópica, el estado de vapor a la salida de la turbina sería:

$$\begin{aligned}s1Eisen &:= s3v \\ s1Eisen &= 6.685 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}\end{aligned}$$

Utilizando la fórmula del título de la mezcla en función de las entropías, el título de mezcla en este punto vendrá dada por:

$$x1Eisen := \frac{s1Eisen - s5}{s4v - s5} \quad \text{Donde: } s5 = s4l$$

$$x1Eisen = 0.905$$

Energía Geotérmica Jaime Pous, [2]

Y la entalpía al final del proceso isentrópico, utilizando la fórmula del título de mezcla en función de las entalpías, será:

$$\begin{aligned}h1Eisen &:= h5 \cdot (1 - x1Eisen) + h4v \cdot x1Eisen \\ h1Eisen &= 2482.9 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\end{aligned}$$

Energía Geotérmica Jaime Pous, [2]

Como el proceso es adiabático no isentrópico, y usando una eficiencia de turbina del 70%, tomado como promedio de las tablas 4.1 y 4.2 detalle 4.3 se tiene:

$$\begin{aligned}\eta_i &:= 0.7 \\ h1E &:= h3v - \eta_i \cdot (h3v - h1Eisen)\end{aligned}$$

$$h_{1E} = 2567.95 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Energía Geotérmica Jaume Pous, [2]

Y el título de mezcla real será:

$$x_{1E} := \frac{h_{1E} - h_5}{h_{4v} - h_5} \quad \text{Donde: } h_5 = h_{4l}$$

$$x_{1E} = 0.944$$

$$s_{1E} := x_{1E} \cdot (s_{4v} - s_5) + s_5$$

$$s_{1E} = 6.906 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

Energía Geotérmica Jaume Pous, [2]

CARACTERISTICAS EN PUNTO (6)

En este punto, la presión y la temperatura son las mismas que el punto "2", teniendo así:

$$P_6 := P_2$$

$$T_6 := T_2$$

$$P_6 = 8 \text{ bar abs}$$

$$T_6 = 170.43 \text{ }^\circ\text{C}$$

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una presión $P_6 = 8$ bar abs y su respectiva temperatura de saturación, se tiene:

Entalpía de líquido saturado:

$$h_6 := h_{2l}$$

$$h_6 = 721.11 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

(Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876)

Y utilizando la fórmula del título de mezcla en función de las entalpías, se tiene:

$$x_6 := \frac{h_6 - h_5}{h_{4v} - h_5}$$

$$x_6 = 0.114$$

Energía Geotérmica Jaume Pous, [2]

$$Q6 = 135.11 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$s6 := [x6 \cdot (s4v - s5)] + s5$$

$$s6 = 2.096 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

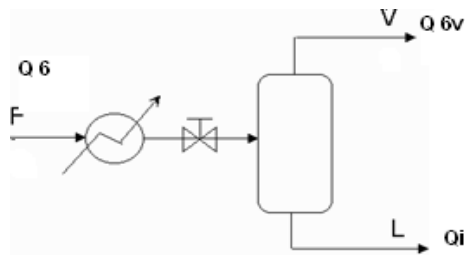
CARACTERÍSTICAS EN PUNTO " 6v "

Son las mismas que en el punto "4", para este primer cálculo ideal, teniendo así:

$$\begin{aligned} P6v &:= P4 & T6v &:= T4 \\ P6v &= 1.5 \text{ bar abs} & T6v &= 111.7 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Condiciones de Flash 2

En el separador siguiendo el balance energético de la sección 5.2.2 tenemos:



Eficiencia del separador 95% ver sección 5.2.1:

$$\eta S2 := 0.95$$

$$Q6v := \eta S2 \cdot Q6 \cdot (x6)$$

$$Q6v = 14.645 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

El 5% que no se logró separar se deberá remover por medio de purgas antes de que llegue el vapor a la turbina en su segunda etapa

$$Qi := Q6 - [Q6v + (1 - \eta S2)Q6v]$$

$$Qi = 119.735 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

CARACTERISTICAS EN EL PUNTO "7"

En este punto, la presión y la temperatura son las mismas que el punto "4", teniendo así:

$$\begin{aligned} T7 &:= T4 & P7 &:= P4 \\ T7 &= 111.7 \text{ } ^\circ\text{C} & P5 &= 1.5 \text{ bar abs} \end{aligned}$$

Como el caudal que sale de la primera etapa de la turbina, se junta con el procedente de la segunda cámara de flash, se tiene el caudal de entrada en la segunda etapa, teniendo así:

"Q7": corresponde al caudal en el punto "7"

$$\begin{aligned} Q7 &:= Q3 + Q6v \\ Q7 &= 57.395 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Utilizando la formulas de entalpías en función del caudal, el valor de la entalpía vendrá dada por:

$$\begin{aligned} h7 &:= \frac{Q3 \cdot h1E + Q6v \cdot h4v}{Q7} \\ h7 &= 2599.96 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \end{aligned}$$

Energía Geotérmica Jaume Pous [2]

Y por consiguiente, el valor del título de la mezcla, utilizando la fórmula de la misma en función de las entalpías, será:

$$\begin{aligned} x7 &:= \frac{h7 - h5}{h4v - h5} \\ x7 &= 0.958 \end{aligned}$$

Energía Geotérmica Jaume Pous [2]

Utilizando la fórmula del título de la mezcla en función de la entropía, se tiene:

$$s7 := x7 \cdot s4v + (1 - x7) \cdot s5$$

$$s7 = 6.99 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

Energia Geotérmica Jaume Pous [2]

CARACTERISTICAS EN EL PUNTO (10)

De acuerdo con las características iniciales descritas en el punto 4.1, detalle tabla 4.3 (Características iniciales del proyecto), se tomo como referencia el siguiente valor:

Temperatura a la salida de la segunda etapa de la turbina y a la que el condensador estará trabajando es:

$$T10 := 40^\circ\text{C}$$

Utilizando las tablas termodinámicas para agua saturada, a una temperatura $T10 = 40^\circ\text{C}$, se tiene:

Entalpía de vapor saturado:

$$h10v := 2574.4 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Entalpía de líquido saturado:

$$h10L := 167.5 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Entropía de vapor saturado:

$$s10v := 8.258 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

Entropía de líquido saturado:

$$s10L := 0.572 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

Presión de saturación a 40°C :

$$P10 := 0.074 \quad \text{bar abs}$$

(Thermodynamics, Yunus A. Cengel Michael A. Bole, Mc Graw-Hill, USA, 2005, paginas 874-876)

CARACTERISTICAS EN EL PUNTO (2E)

En este punto, la presión y la temperatura son las mismas que el punto "10", teniendo así:

$$T2E := T10$$

$$P2E := P10$$

$$T2E = 40 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P2E = 0.074 \quad \text{bar}$$

Si la expansión fuera isentrópica, el estado de vapor a la salida de la turbina sería:

$$s_{2Eisen} := s_7$$

$$s_{2Eisen} = 6.99 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}$$

Energía Geotérmica Jaume Pous, [2]

Utilizando la fórmula del título de la mezcla en función de las entropías, el título de mezcla en este punto vendrá dada por:

$$x_{2Eisen} := \frac{s_{2Eisen} - s_{10L}}{s_{10v} - s_{10L}}$$

$$x_{2Eisen} = 0.835$$

Energía Geotérmica Jaume Pous, [2]

Y la entalpía al final del proceso isentrópico, utilizando la fórmula del título de mezcla en función de las entalpías, será:

$$h_{2Eisen} := h_{10L} \cdot (1 - x_{2Eisen}) + h_{10v} \cdot x_{2Eisen}$$

$$h_{2Eisen} = 2177.2 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Energía Geotérmica Jaume Pous, [2]

Como el proceso es adiabático no isentrópico, y usando una eficiencia de turbina del 70%, tomado como promedio de la tablas 4.1, 4.2 y 4.3, se tiene:

$$\eta_i := 0.7$$

$$h_{2E} := h_7 - \eta_i \cdot (h_7 - h_{2Eisen})$$

$$h_{2E} = 2304.03 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Energía Geotérmica Jaume Pous, [2]

Y el título de mezcla real será:

$$x_{2E} := \frac{h_{2E} - h_{10L}}{h_{10v} - h_{10L}}$$

$$x_{2E} = 0.888$$

Energía Geotérmica Jaime Pous, [2]

$$s_{2E} := s_{10L} \cdot (1 - x_{2E}) + s_{10v} \cdot x_{2E}$$

$$s_{2E} = 7.395 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

CARACTERISTICAS EN EL PUNTO (8)

En este punto las características son las mismas que el punto "6v", el cual tiene la misma presión que en el punto 7

$$T_8 := T_{6v}$$

$$T_8 = 111.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_8 := P_{6v}$$

$$P_8 = 1.5 \text{ bar}$$

$$h_{6v} := h_7$$

$$h_8 := h_{6v}$$

$$h_8 = 2.6 \times 10^3 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$s_{6v} := s_7$$

$$s_8 := s_{6v}$$

$$s_8 = 6.99 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

$$x_{6v} := x_7$$

$$x_8 := x_{6v}$$

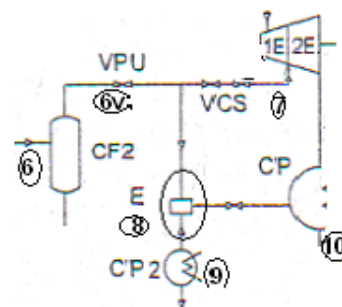
$$x_8 = 0.958$$

El caudal será el porcentaje que se use para el eyector de gases no condensables el mismo que luego servirá para los otros usos de la comunidad y el porcentaje de extracción intermedia estará representado por y_{8e} , teniendo así:

$$y_{8e} := 0.10$$

$$Q_8 := y_{8e} \cdot Q_{6v}$$

$$Q_8 = 1.464 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$



Como se utilizó un eyector que utiliza un porcentaje del fluido que proviene del segundo flash, el nuevo valor de Q_7 sería:

$$Q_7 := Q_3 + (y_{8e} \cdot Q_{6v})$$

$$Q7 = 44.214 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

CALCULO DEL EYECTOR

Se usara uno de dos etapas por estar dentro del rango de trabajo de 1.27 mm a 3 mm Hg de presión absoluta. Mayor detalle ver en la sección 5.6.1

CALCULO DEL TRABAJO DE LA PRIMERA ETAPA DE LA TURBINA

$$w1 := Q3 \cdot (h3v - h1E)$$

$$w1 = 8.484 \times 10^3 \text{ KW}$$

CALCULO DEL TRABAJO DE LA SEGUNDA ETAPA DE LA TURBINA

$$w2 := Q7 \cdot x7 \cdot (h7 - h2E)$$

$$w2 = 1.254 \times 10^4 \text{ KW}$$

CALCULO DE LA POTENCIA INTERNA

Esta es una turbina de doble etapa con extracción intermedia seleccionada Anteriormente (ver sección 5.1)

Valores asumidos de eficiencias:

Eficiencia Mecánica

$$\eta_m := 0.85$$

Eficiencia Eléctrica

$$\eta_e := 0.9$$

$$P_{gen} := (w1 + w2) \cdot \eta_e \cdot \eta_m$$

$$P_{gen} = 1.608 \times 10^4 \text{ KW}$$

Son promedio de los valores obtenidos de las tablas 4.1, 4.2.y 4.3

Rango de potencia de acuerdo con el porcentaje de extracción intermedia para otros usos.

Cuando $\eta_e = 0.9$ la potencia interna de generación será máxima

$$Q7_{max} := Q3 + 0.9 \cdot Q6v$$

$$w2_{max} := Q7_{max} \cdot x7 \cdot (h7 - h2E)$$

$$P_{genmax} := (w1 + w2_{max}) \cdot \eta_e \cdot \eta_m$$

$$P_{genmax} = 1.862 \times 10^4 \text{ KW}$$

Cuando $y8e = 0$ la potencia interna de generación será mínima

$$P_{genmin} := (w1) \cdot \eta_e \cdot \eta_m$$

$$P_{genmin} = 6.49 \times 10^3 \text{ KW}$$

CALCULO DEL CONSUMO ESPECÍFICO MÁXIMO Y MÍNIMO DE VAPOR

$$Conespemax := \frac{(Q3 + Q7_{max}) \cdot 3600}{P_{gen}}$$

$$Conespemax = 22.09 \frac{\text{Kg}}{\text{KW} \cdot \text{h}}$$

$$Conespemin := \frac{(Q3 + Q7) \cdot 3600}{P_{gen}}$$

$$Conespemin = 19.47 \frac{\text{Kg}}{\text{KW} \cdot \text{h}}$$

Energía Geotérmica Jaume Pous, [2] (transformación de segundos a hora)

POTENCIA DE CONSUMO PROPIO DE LA PLANTA:

Se asume un valor referencial de consumo de energía que podría tener una central geotérmica de similares características, esto es el uso de bombas, electricidad para iluminación, tc, teniendo así:

$$P_{consu} := 1500 \text{ KW}$$

Consumo promedio ver tabla 4.1, 4.3

Potencia eléctrica máxima y mínima generada:

$$P_{netamax} := P_{genmax} - P_{consu}$$

$$P_{netamax} = 1.712 \times 10^4 \text{ KW}$$

$$P_{netamin} := P_{genmin} - P_{consu}$$

$$P_{netamin} = 4.99 \times 10^3 \text{ KW}$$

CALCULO EN EL PRIMER CONDENSADOR

$$Q10_{max} := Q7_{max} \cdot x7$$

$$Q10_{max} = 53.583$$

$$Q10_{min} := Q7 \cdot x7$$

$$Q10_{min} = 42.359$$

Este es el caudal a la salida de la turbina en su segunda etapa que ingresa al condensador 1 o principal.

$$PCP1_{\max} := Q10_{\max} \cdot (h2E - h10L) \quad PCP1_{\min} := Q10_{\min} \cdot (h2E - h10L)$$

$$PCP1_{\max} = 1.145 \times 10^5 \text{ KW} \quad PCP1_{\min} = 9.05 \times 10^4 \text{ KW}$$

Ver en sección 5.1.2.c, 5.3.2 y referencia [2]

CALCULO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

Caudal para refrigerar que ingresa al condensador:

$$Cr := 4.18 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \quad \text{Calor especifico del agua fria.}$$

$$TR11s := 40 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura de salida del condensador hacia la torre}$$

$$TR11e := 10 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura de entrada del condensador desde la torre}$$

$$Qr := \frac{PCP1_{\max}}{[Cr \cdot (TR11s - TR11e)]} \quad Qr = 912.931 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{de agua fria}$$

Calculo de aire que ingresa a la torre para enfriar el agua que viene del condensador:

$$Tae := 21 \text{ }^\circ\text{C} \quad hae := 299 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}}$$

Es la entalpía específica de aire en las condiciones de entrada (KJ/kg), en Chachimbiro está entre 20 a 30 °C.

$$Tas := 30 \text{ }^\circ\text{C} \quad has := 306 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}}$$

Es la entalpía específica de aire en las condiciones de salida (KJ/kg) está entre 30 a 45°C.

$$Qa := Qr \cdot Cr \cdot \left[\frac{(Tas - Tae)}{(has - hae)} \right] \quad Qa = 4.906 \times 10^3 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Consumo de agua de reposición:

Es la humedad absoluta del aire que entra (kg de agua/ kg de aire seco) en Chachimbiro está entre 20 a 30%.

$$x_{hae} := 0.25$$

Es la humedad absoluta del aire expulsado (Kg de agua/ Kg de aire seco) menor al 40%

$$x_{has} := 0.30$$

Entonces:

$$Q_{ar} := Q_a \cdot (x_{has} - x_{hae}) \quad Q_{ar} = 245.318 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Cantidad de agua que se repone gracias a la humedad que se tienen en el vapor de descarga de la turbina, esto es igual a 11.2%, ver en la parte de cálculo de la segunda etapa de estos cálculos y en la sección 5.4.2.

Cantidad de calor por Kg a la salida de la turbina segunda etapa

$$\text{Cal} := (0.885 \cdot h_{10v}) + (0.112 \cdot h_{10L})$$

$$\text{Cal} = 2.297 \times 10^3 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}}$$

Si el agua de enfriamiento ingresa al condensador a 10 grados y sale a 40 °C con un calor latente de 136.435 KJ.

Tendremos que para evaporar 1 Kg de agua de enfriamiento se requerirán:

$$\text{Calkg} := (40 - 10) \cdot 136.435$$

$$\text{Calkg} = 4.093 \times 10^3 \text{ kJ}$$

Kg de ganancia:

$$k_{ganancia} := 100 \cdot \left[\left(\frac{\text{Calkg}}{\text{Cal}} \right) - 1 \right]$$

$$k_{\text{ganancia}} = 78.183 \quad \%$$

En consecuencia habría una ganancia de masa de 78% en el agua de enfriamiento circulada.

CALCULO EN EL SEGUNDO CONDENSADOR

$$Q_{8\text{max}} := (1 - y_{8e}) \cdot Q_{6v}$$

$$PCP_{2\text{max}} := Q_{8\text{max}} \cdot (h_7 - h_5)$$

$$PCP_{2\text{max}} = 2.811 \times 10^4 \text{ KW}$$

$$PCP_{2\text{min}} := Q_8 \cdot (h_7 - h_5)$$

$$PCP_{2\text{min}} = 3.124 \times 10^3 \text{ KW}$$

Ver en sección 5.1.2.c, 5.3.2 y referencia [2]

EFICIENCIA TERMICA MÁXIMA Y MÍNIMA

Ciclo cerrado

$$\eta_{tc\text{max}} := \frac{[Q_3 \cdot (h_{3v} - h_{1E})] + [Q_{7\text{max}} \cdot x_7 \cdot (h_7 - h_{2E})]}{[Q_{\text{total}} \cdot h_m - [(Q_i) \cdot h_5 + Q_{7\text{max}} \cdot x_7 \cdot h_{10L}]]} \quad \eta_{tc\text{min}} := \frac{[Q_3 \cdot (h_{3v} - h_{1E})] + [Q_7 \cdot x_7 \cdot (h_7 - h_{2E})]}{[Q_{\text{total}} \cdot h_m - [(Q_i) \cdot h_5 + Q_7 \cdot x_7 \cdot h_{10L}]]}$$

$$\eta_{tc\text{max}} = 0.155$$

$$\eta_{tc\text{min}} = 0.132$$

$$\eta_{tc\% \text{max}} := \eta_{tc\text{max}} \cdot 100$$

$$\eta_{tc\% \text{min}} := \eta_{tc\text{min}} \cdot 100$$

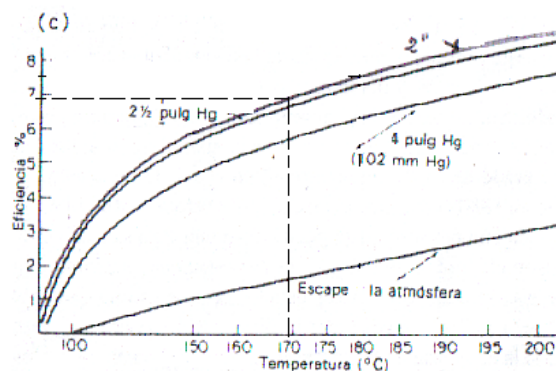
$$\eta_{tc\% \text{max}} = 15.5\%$$

$$\eta_{tc\% \text{min}} = 13.2\%$$

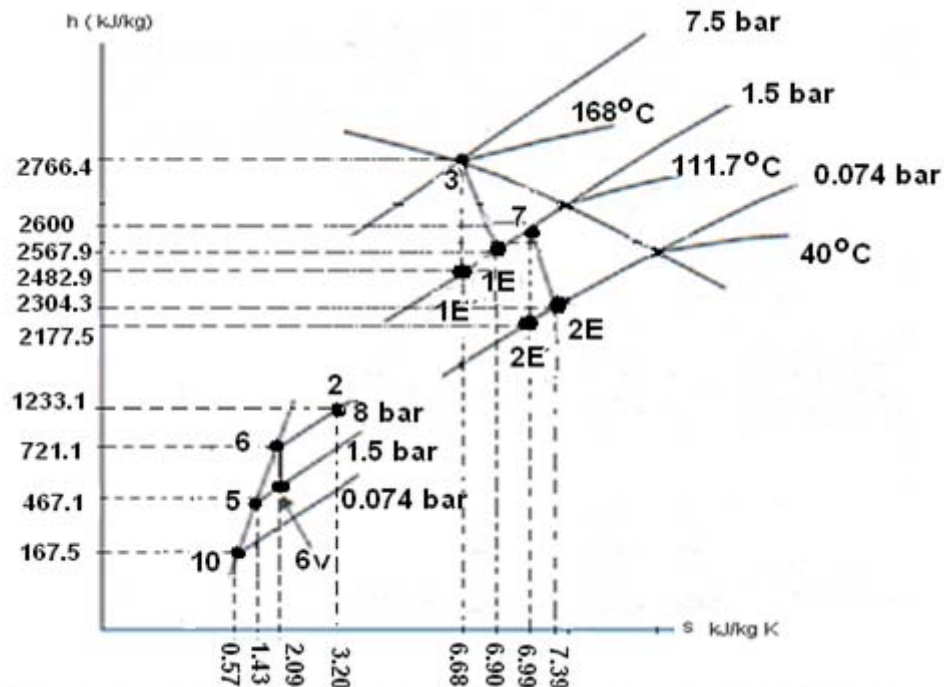
Energía Geotérmica Jaime Pous, [2]

Ciclo abierto

Usando la figura 10.5 b) para vaporización sencilla de eficiencia típicas de generación geotérmica del libro Geothermal energy by H. Christopher H. Armstead, 1989, Editorial Limusa S.A. pagina 240.



- En el eje (x) con una temperatura de 167.78 equivalente a 7.5 bar.
- La salida de la turbina se da a 2 plg de Hg es eso a los 40 °C en el condensador.
- Con lo que obtenemos en el eje y el valor de 6.8% de eficiencia.



Representación del ciclo de vapor sobre un diagrama entalpia-entropia de doble flash

Tabla de valores en cada uno de los puntos que intervienen en el proceso

PUNTO	PRESION (bar abs)	TEMPERATURA (°C)	ENTALPIA (kJ/kg)	ENTROPIA (kJ/kg K)	CAUDAL (kg/s)	TIPO DE FLUIDO
1	10	179.9	1266.6		180	Vapor-agua 0.25
2	8	170.4	1233.1	3.20	180	Vapor-agua 0.25
3	7.5	167.8	2766.4	6.68	43	Vapor seco
1E'	1.5	111.7	2482.9	6.68	43	Vapor húmedo 0.90
1E	1.5	111.7	2567.9	6.90	43	Vapor húmedo 0.95
4	Es un punto teórico usado en el calculo para encontrar el punto 1E					
5	1.5	111.7	467.1	1.43	121	Agua
6	8	170.4	721.1	2.09	137	Agua
6v	1.5	111.7	467.1	2.09	16	Vapor-agua 0.114
7	1.5	111.7	2600.0	6.99	59	Vapor húmedo 0.96
8	1.5	111.7	2600.0	6.99	1.6, es 10% de la extracción intermedia	Vapor húmedo 0.95
2E'	0.074	40	2177.2	6.97	57	Vapor húmedo 0.84
2E	0.074	40	2304.1	7.39	57	Vapor húmedo 0.88
10	0.074	40	167.5	0.57	57	Agua

CALCULO DE LAS TUBERIAS

No se hacen cálculos exactos de diámetros y espesores tanto para las tuberías como para los aislantes ya que no se tiene valores reales del fluido y de las distancias del lugar donde se podría construir la central, estos cálculos son una representación o una base para un futuro realizar un diseño de detalle.

Velocidades del fluido:

Para comprobación de los valores referirse a la tabla 4.3 y a la sección 5.5.2

Diámetros de tubería:

Usando las ecuaciones básicas de fluidos como:

$$V=v*m$$

V, volumen (m³)

v, volumen específico (m³/Kg)

m, masa (Kg)

$$Q= V/t \quad \text{o} \quad Q= A*v_e$$

Q, caudal (m³/s) Q, caudal (m³/s)

V, volumen (m³) A, area (m²)

t, tiempo (s) V_e, velocidad (m/s)

tramos	presión (bar abs)	caudal (kg/s)	volumen específico (m ³ /kg)	velocidad (m/s)	dia. interior (m)	dia. Interior (plg)
a	10	180	0.19444	15	0.743	29
b	10	135	0.001127	2	0.024	1
c	7.5	45	0.2556	4	0.916	36
d	1.5	15	1.1593	6	0.923	36

Si se aumenta la velocidad, el diámetro interior es menor, pero bien se podría tener mayores pérdidas de presión.

El material más usado es el acero ASTM A106, Gr B y el ASTM A335, Gr P11 c P22

Espesor de pared:

El código referente es el ASME B31.1 para tubería de conducción de fluidos calientes de potencia. Según este código para encontrar el espesor de pared requerido en la tubería se seguirá la siguiente ecuación:

Si usamos diámetro interior:

$$t = \frac{Pd_i + 2SE + 2yPA}{2(SE + Py - P)}$$

Donde:

E: Es 1 por ser tuberías sin costura.

S: 15000 psi según ASME B31.1 para el ASTM A106 Gr B, entre temperaturas de servicio de -20 a 650 F.

y; es 0.4 para materiales ferrosos

P: será la presión de operación más unos 30 psi o el 10% aproximadamente.

A, es la cantidad de material removido por la corrosión.

Para mayor detalle de esta fórmula referirse al código ASME B31.1 o sección 5.5.2 de este texto.

diametro interior (in)	presión (bar abs)	presion (psi)	S (psi)	y (adimensi)	A (in)	espesor (in)
29	10	175	15000	0.4	0.06	1.18
1	10	175	15000	0.4	0.06	1.01
36	7.5	139	15000	0.4	0.06	1.17
36	1.5	25	15000	0.4	0.06	1.03

Aquí se muestra cuales son los espesores mínimos requeridos, los cuales pueden ir variando de acuerdo a las variables ya mencionadas, y a lo que los fabricantes digan.

PERDIDAS DE PRESION.

En una tubería mientras más acoples, curvas, desvíos, elementos y modificaciones haya, mayor será la caída de presión que en una sección completamente recta, para lo cual hay manuales que permiten encontrar las caídas de presión dependiendo de las condiciones mencionadas.

En general y por medio de la experimentación en algunas centrales se habla de que desde la boca de pozo hasta el ingreso de la turbina, durante ese tramo que está lleno de elementos como los separadores, curvas, desviaciones, omegas, y demás se tiene una caída de presión alrededor de un 25% y para los demás tramos dependerá de cuan complejo sea el sistema.

Como ejemplo de cálculo se realizo lo siguiente.

Para los ductos por donde se conduce vapor:

$$\Delta P_f = 0.8 \frac{L\dot{m}^{1.85}}{\rho D^{4.97}}$$

ΔP_f Perdidas de presión por rozamiento (1lbf=32,174lbfm)

L: longitud del tramo (ft),

m: es el flujo que circula (lbfm/h),

ρ : es la densidad del fluido (lbfm/ft³),

D: es el diámetro interno de la tubería (in).

La caída de presión estará dada en lbf/in².

El factor de 0.8 es de acuerdo a las unidades usadas

Del libro especializado en Geotérmica por Ronald Dipipo [6]

tramos	Longitud (ft)	Flujo lbf/h	densidad (lbfm/ft ³)	Diametro interno (in)	Caída de presión	
					lbf/in ²	bar
c	10	9600	0.3	36	11.4	0.8
d	10	3218	0.054	36	8.4	0.6

Para mayor detalle del tipo de materiales, sistema de transporte, velocidad optima ver en el 5.5.2

Para los conductos por donde se conduce agua

$$\Delta P_f = 1.75 \times 10^{-4} \frac{fL\dot{m}^2}{\rho D^5}$$

ΔP_f Perdidas de presión por rozamiento

L: longitud del tramo (ft),
 m: es el flujo que circula (lbm/h),
 ρ: es la densidad del fluido (lbm/ft³),
 D: es el diametro interno de la tuberia (in)

La caída de presión estará dada en lbf/in².

El factor de 1.75×10^{-4} es de acuerdo a las unidades usadas

Del libro especializado en Geotérmica por Ronald Dipipo [6]

f, es el facto de fricción dado por Swamee-Jain

$$f = \frac{0.25}{\left\{ \log_{10} \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right] \right\}^2}$$

D: es el diámetro interno de la tubería (in).

E: es la rugosidad interna.

Re es el número de Reynolds.

m: es el flujo que circula (lbm/h),

D: es el diámetro interno de la tubería (in).

μ': es la viscosidad absoluta

$$\mu := 1.223 \cdot 10^{-4} \quad \text{lbm/ft s para agua a 145 lbf/in}^2, \text{ abs y } 300^\circ\text{F}$$

$$D := \frac{1}{12} \quad \text{ft}$$

$$\dot{m} := 135 \quad \frac{\text{lbm}}{\text{s}}$$

$$\text{Re} := \left(\frac{4}{\pi} \right) \cdot \left(\frac{\dot{m}}{\mu \cdot D} \right)$$

$$\text{Re} = 1.687 \times 10^7$$

$$\varepsilon := 1.48 \cdot 10^{-4} \quad \text{ft, para el acero comercial ASTM A106 Gr B}$$

$$f := \frac{0.25}{\left[\left[\left(\frac{\varepsilon}{D} \right) \right] \right]^2 \left[\log \left[\frac{1}{3.7} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right] \right]^2}$$

$$f = 0.023$$

$$L := 500 \quad \text{ft}$$

$$\rho := 5.2 \quad \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}$$

$$D := 1 \quad \text{in}$$

$$\Delta P_f := 1.75 \cdot 10^{-4} \frac{\left[\left(f \cdot L \cdot m^2 \right) \right]}{\left[\rho \cdot D^5 \right]}$$

$$\Delta P_f = 6.968 \quad \text{Psi}$$

$$\Delta P_f (\text{bar}) := \frac{\Delta P_f}{14.96}$$

$$\Delta P_f (\text{bar}) = 0.466 \quad \text{bar}$$

PERDIDAS DE TEMPERATURA:

Para obtener un cálculo real se debe hacer pruebas de laboratorio y de campo con los valores reales de las características del fluido. Para este caso se han tomado los datos referenciales obtenidos en las diferentes centrales geotérmicas de similares características de suelo y condiciones de ambiente como las de Chachimbiro, ya que el objetivo es dar a conocer los valores más usados y como base para una ingeniería de detalle.

Se usa como aislante la magnesia y en otros la vermiculita, por su economía y su gran eficacia, con los que se evitan caídas de temperatura hasta en un 90%. Estos dos materiales son típicos de las zonas geotérmicas y al ser los más usados en la actualidad varios autores de libros importantes como: Jaime Pous, (experto en geotermia), H Christopher, H Armstead, entre otros, en el estudio de la geotermia han llegado a resumir en un cuadro los rango diferentes que se puede obtener con dichos materiales.

Para este caso tomamos el valor medio del rango de tuberías aislada con vermiculita con condiciones ambientales similares a las de Chachimbiro teniendo un valor de pérdidas de calor de entre 0.1-1 °C/Km de tubería enterrada con espesores entre 40 a 60 mm dependiendo de la temperatura interna del fluido en cada ramal.

Para sustentar lo anteriormente escrito y para más detalle del espesor óptimo y de los rangos obtenidos con estos dos materiales referirse a 5.5.1.1 y 5.7 donde como ejemplo tenemos:

- En Miravalles se aísla las tuberías con lana de vidrio con espesores espesor de 2 plg (50mm).
- En Islandia para tuberías de conducción de agua caliente con diámetros interiores superiores a los 90 cm se aíslan con lana de roca y una capa de protección superficial de plástico y aluminio de espesores entre 40 a 70 mm en total.

Además se sustenta el uso de estos materiales debido a que sus características como aislantes son:

- La vermiculita dispone de:
 - Densidad aparente de 90 kg/m³.
 - Punto de fusión elevado entre 1200 / 1300 °C, siendo por tanto un material incombustible (M-0)
 - Una conductividad térmica reducida, siendo esta una buena propiedad de aislamiento térmico y de un valor medio que ronda los 0,053 kcal/h m²·°C.
 - En relación con los aislantes térmicos más usados con mejores rangos la vermiculita es una gran solución y también económica.
- Lana de roca
 - Con 0,030 a 0,041 W/(m·K.)
- Lana de vidrio
 - Con 0,065 a 0,056 W/m·K (0,056 a 0,049 kcal/h·m²·°C)
- Poliestireno Expandido (EPS)
 - Con 0,045 a 0,034 W/m·K

- Espuma celulósica
Con 0,03 W/m·K
- Espuma de polietileno
Con 0,036 y 0,046 W/m°C
- Espuma de poliuretano
Con 0,023 W/m·K
- Espuma elastomérica
Con 0,030 kcal/h·m·°C

Ejemplo numérico para el tramo entre el primer separador y la turbina:

Utilizando la siguiente fórmula:

$$q = \frac{2\pi}{f_i + \frac{1}{R_i h_i} + \frac{\ln \frac{R_e}{R_i}}{k_t} + \frac{\ln \frac{R_{ex}}{R_e}}{k_a} + \frac{1}{R_{ex} h_{ex}}} (T_{in} - T_{ex})$$

q, Potencia térmica disipada por unidad de longitud de tubería (W/m).

f_i, Es el factor de ensuciamiento de la superficie interior de la tubería (m/W).

R_i, Es el radio interior de la tubería (m).

R_e, Es el radio exterior de la tubería (m).

R_{ex}, Es el radio exterior de la tubería más aislante (m).

h_i, Es el coeficiente de convección de la superficie interior (W/m² °C).

h_{ex}, Es el coeficiente de transmisión de la superficie exterior (W/m² °C).

k_t, Es el coeficiente de conducción del material de la pared de la tubería (W/m² °C).

k_a, Es el coeficiente de conducción del aislante térmico (W/m² °C).

T_{in}, Es la temperatura del agua en el interior de la tubería (°C).

T_{ex}, Es la temperatura del exterior (°C).

Si la tubería no tiene aislamiento el factor donde se incluya valores del aislamiento se lo elimina de la fórmula general.

Ver referencia [2, 10]

$$C_p := 2000 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

$$m := 45 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$\Delta T := 0.035 \frac{\text{C}}{\text{m}} \quad \text{ver en la seccion 5.5.1}$$

$$q := m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$q = 3.15 \times 10^3 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

$$T_i := 170 \text{ C} \quad T_e := 20 \text{ C}$$

$$R_i := 0.9144 \text{ m} \quad R_e := 0.9398 \text{ m}$$

Para calcular el valor de convección interno, tenemos que primero calcular el valor de Re y Nu

Con 8 bar:

$$k := 31.7 \cdot 10^3 \frac{\text{W}}{\text{mC}} \quad L := 213 \text{ m}$$

$$Pr := 1.12$$

$$u := 14.5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$$

$$\rho := 4.1 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\nu := \frac{u}{\rho} \quad \nu = 3.537 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Re := \frac{u \cdot L}{\nu} \quad Re = 873.3$$

$$Nu := 0.664 \cdot Re^{\frac{(1)}{(2)}} \cdot Pr^{\frac{(1)}{(3)}} \quad Nu = 20.378$$

$$h_i := \frac{Nu \cdot k}{L} \quad h_i = 3.033 \times 10^3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

$$k_t := 80 \frac{\text{W}}{\text{mC}}$$

$$k_a := 0.053 \frac{\text{W}}{\text{mC}}$$

$$\text{hex} := 200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

$$\text{fi} := 1 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$$

$$\text{root} \left[\frac{2 \cdot \pi}{\text{fi} + \left(\frac{1}{\text{Ri} \cdot \text{hi}} \right) + \left(\frac{\ln \left(\frac{\text{Re}}{\text{Ri}} \right)}{\text{kt}} \right) + \left(\frac{\ln \left(\frac{\text{Rex}}{\text{Re}} \right)}{\text{ka}} \right) + \frac{1}{\text{Rex} \cdot \text{hex}}} \cdot (\text{Ti} - \text{Te}) - \text{q} \right], \text{Rex} = 0.955 \text{ m}$$

$$\text{Rex} := 0.955$$

$$\text{expesor} := \text{Rex} - \text{Re}$$

$$\text{expesor} = 0.015 \text{ m}$$

CALCULO DE LAS BOMBAS

En este sistema hay tres bombas centrifugas donde la diferencia entre ellas radica en el tipo de fluido que mueve, así tenemos:

- Primero: La bomba para llevar el agua caliente hacia la parte alta de la torre.
- Segunda: La bomba para llevar el fluido frio o de refrigeración hacia el condensador.
- Tercera: La bomba de reinyección si fuese necesario o bien para llevar este fluido a otro tipo de

$$P_{e,r} = Q_r \cdot v_r \cdot \Delta p_r \cdot \eta_{b,r}$$

Donde: v_r es el volumen especifico del fluido refrigerante dado en m^3/kg .

Δp_r Es la diferencia de presión entre bocas de aspiración e impulsión.

$\eta_{b,r}$ es la eficiencia del grupo motobomba o del ventilador de refrigeración.

Q_r es el caudal.

$$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\rho_v = \frac{1}{0.001} \quad \rho = 1 \times 10^3 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{alt} := 3 \text{ m}$$

$$\Delta Ph := g \cdot \rho \cdot alt$$

$$\Delta Ph = 2.943 \times 10^4 \quad Pa$$

$$\Delta Ph_{KPa} := \frac{\Delta Ph}{1000}$$

$$\Delta Ph_{bar} := \frac{\Delta Ph}{101325} \quad \Delta Ph_{bar} = 0.29 \quad bar \text{ abs}$$

En la sección del consumo interno de la central ya se tomo encuentra la potencia de consumo de las bombas, pero de una manera aproximada y en conjunto con todos los sistemas que podían consumir energía, para que se entienda de mejor manera los cálculos tenemos como ejemplo para la bomba que lleva el agua caliente hacia la torre será:

$$Q_{te} := 900 \quad \frac{kg}{s}$$

$$V_r := 0.0008 \quad \frac{m^3}{kg}$$

$$\eta_b := 0.95$$

$$P_b := \frac{(Q_{te} \cdot V_r \cdot \Delta Ph_{KPa})}{\eta_b}$$

$$P_b = 22.305 \quad kw$$

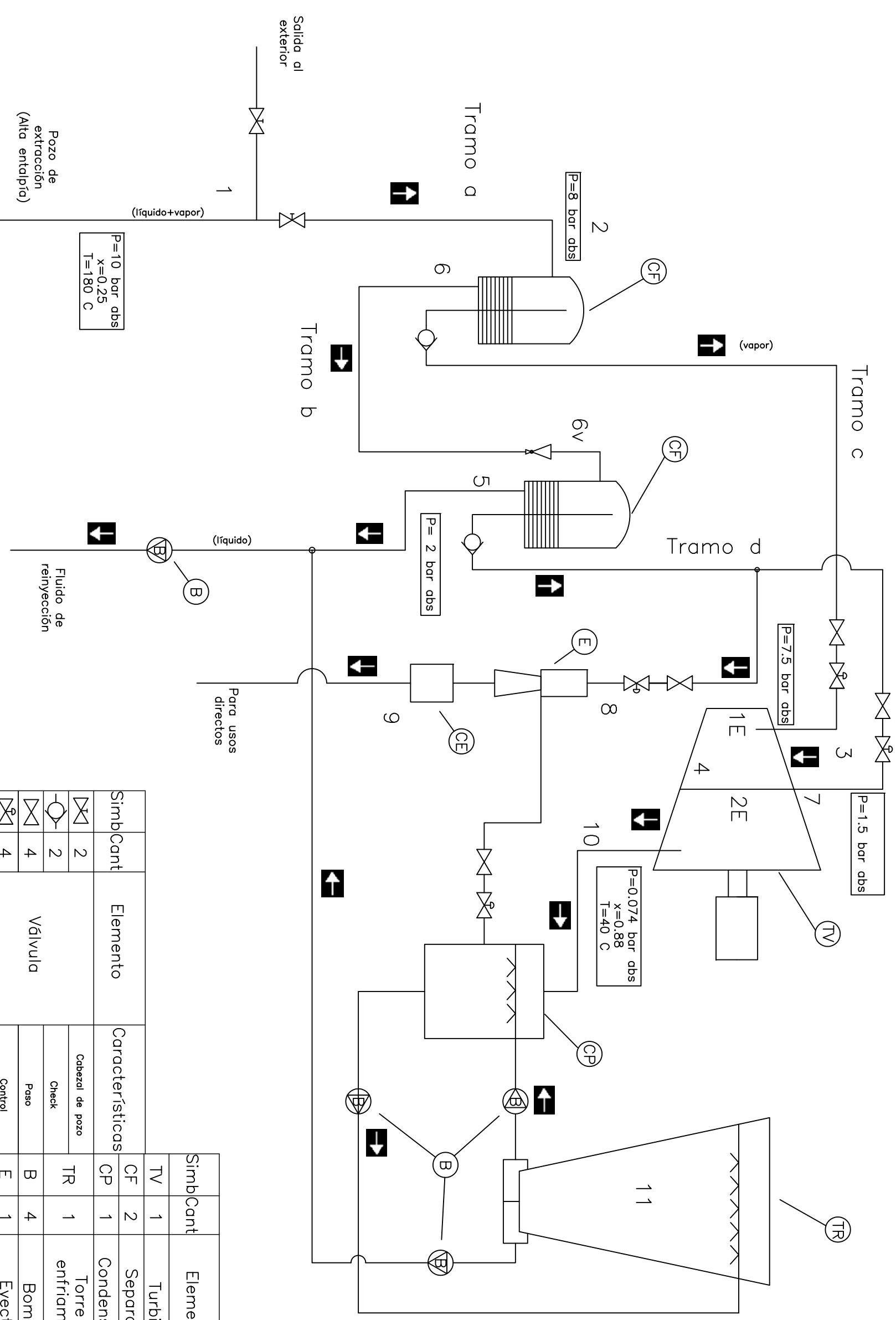
$$P_b := P_b \cdot \frac{1000}{750}$$

$$P_b = 29.74 \quad HP$$

Para mayor detalle sobre la formula, condiciones de uso y tipos de bombas ver en la sección 5.6.5 y 2.3.2.1.2

ANEXO 3

Esquema del sistema seleccionado



SimbCant	Elemento	Características	SimbCant	Elemento	Características
2	Válvula	Cabezal de pozo	TR	1	Torre de enfriamiento tipo mecánico forzado
2		Check	CP	1	Condensador de chorro barométrico
4		Paso	B	4	Bomba
4		Control	E	1	Eyector
1		Reductora de presión	CE	1	Condensador sec.

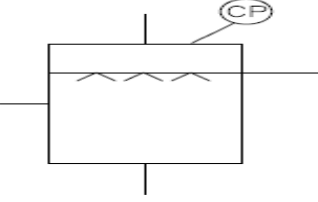
Fecha	Nombre	Firma	Material:	Cantidad:
15/11/09	E, Serrano		N/S	1
24/11/09	Ing. Contreras		Contiene:	Escala:
19/11/09	J. Rosero		Esquema del Proceso	N/A
24/11/09	Ing. Soría		Código:	EPP1
ESCUOLA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO			Sustituye a:	
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA				Hoja: 1/1

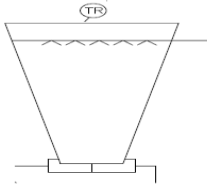
ANEXO 4

Hojas de datos

HOJA DE DATOS		
Elemento:	TURBINA	
Esquema:	Características Técnicas:	
	Potencia:	17 MW (max)
	Presión ingreso:	7- 10 bar
	Temperatura entrada:	170 - 210 oC
	Temperatura salida:	40 - 50 oC
	Factor de potencia:	85 - 95%
	Velocidad de rotación:	3600 rpm
	Presión en la descarga:	0.085 - 0.125 bar
Otro:	ninguno	
Descripcion:	Material:	
<p>Turbina de dos etapas de condensación, con una entrada de presión alta y otra a baja. También puede utilizarse módulos compuestos tipo turbina - generador, muy fáciles de movilizar.</p>	Dependen de la composición química de los geofluidos, y varía de acuerdo con cada uno de los elementos de la turbina	
	Principal Fabricante:	
	Mitsubishi, una de los fabricante con mayor experiencia en el mercado	
	Mantenimiento:	
	No requieren mucho mantenimiento, y depende también de los parámetros iniciales de los geofluidos. Control visual permanente.	

HOJA DE DATOS		
Elemento:	SEPARADOR DE VAPOR	
Esquema:	Características Técnicas:	
	Tipo:	ciclónico
	Presión:	7- 10 bar
	Temperatura:	170 - 210 oC
	Mezcla:	0.25 - 0.30
	Eficiencia:	95 - 99.99%
	Velocidad máxima recomendada del vapor	25 -40 m/s
	Otro:	ninguno
Descripcion:	Material:	
<p>Los separadores ciclónicos son los más utilizados en la industria geotérmica, debido principalmente a su gran eficiencia (+95%), además es un elemento muy versátil y puede adaptarse a todo terreno, lugar y central de producción de energía. Cuenta con gran aptitud para trabajar a altas presiones y temperaturas, fácil construcción, bajo costo de construcción.</p>	Pueden formarse con cualquier material apropiado que sea resistente al ataque o corrosión por parte de los geo-fluidos.	
	Principal Fabricante:	
	En nuestro país existen empresas como Acindec y Acero de los Andes que cuentan con la infraestructura y tecnología necesarias para diseñar y construir los separadores.	
	Mantenimiento:	
	Su mantenimiento es mínimo, depende los parámetros iniciales de los geo-fluidos. Control visual permanente. Recomendamos la instalación de camisas de aislamiento para incrementar el rendimiento del separador.	

HOJA DE DATOS		
Elemento:	CONDENSADOR	
Esquema:	Características Técnicas:	
	Tipo:	Chorro
	Presión:	0.074 - 0.1 bar
	Temperatura entrada:	40 - 50 oC
	Temperatura salida:	25 - 30 oC
	Cantidad de oxígeno por litro de agua condensada	0.05 cm3
	Otro:	ninguno
Descripcion:	Material:	
<p>El condensador de chorro, para funcionar con un eyector para mantener una presión menor a la atmosférica</p>	<p>Dependen de varios factores, a saber: propiedades mecánicas, resistencia química, consumo y pureza del producto.</p>	
	Fabricante:	
	Mitsubishi, una de los fabricante con mayor experiencia en el mercado	
	Mantenimiento:	
	Su mantenimiento es mínimo, bastara con una limpieza anual de sus cañerías o si fuese necesario se lo hará más seguido.	

HOJA DE DATOS		
Elemento:	TORRE DE ENFRIAMIENTO	
Esquema:	Características Técnicas:	
	Tipo:	Tiro mecánico forzado
	Temperatura:	40 - 60 oC
	Provocan enfriamientos entre:	10 - 20 oC
	Carga de aire:	900 - 1800 lb/h*ft2
	Carga de agua:	500 - 2000 lb/h*ft2
	Otro:	ninguno
Descripcion:	Material:	
<p>Debido a las características particulares que presenta la zona de Chachimiro, el uso de una torre de enfriamiento de tiro mecánico forzado sería la ideal, siendo las más utilizadas en el área geotérmica debido a que no requieren grandes cantidades de agua de reposición.</p>	<p>Generalmente están constituidas con diversos materiales como la madera, plásticos, etc. formando estructuras de puentes múltiples, también se emplean estructuras de aluminio, ladrillo, concreto o asbesto.</p>	
	Principal Fabricante:	
	En nuestro país existen empresas como Acindec y Acero de los Andes que cuentan con la infraestructura y tecnología necesarias para diseñar y construir torres de enfriamiento.	
	Mantenimiento:	
	Mantenimiento programado, limpieza de cisterna, cuerpo y ducto de la torre con agua a presión, principalmente	

REFERENCIAS

BIBLIOGRAFICAS

1. H. CHRISTOPHER H. ARMSTEAD, Geothermal energy, 1989, Editorial Limusa S.A.
2. JAUME POUS, Energía Geotérmica, España, Ediciones Ceac, 2004.
3. MATSUO, K. Drilling for geothermal steam and hot water, 1973.
4. NEW ZEALAND GOVERNMENT, Wairakei. Power from the earth. The story of Wairakei geothermal project, 1970.
5. YUNUS A. CENGEL MICHAEL A. BOLE , Thermodynamics, Mc Graw-Hill, USA, 2005,
6. RONAL DIPIPO Geothermal Power Plants, Second Edition Principal Applications, Case Studies and Environmental Impact, USA, 2005.
7. L. RYBACH AND MUFFLER, Geothermal Systems, principles and case histories, 1981, paginas 221-335
8. 21ST ANNUAL PNOC-EDC, Geothermal Conference, Makati city and leyte, Philippines, 2000, paginas 131-159
9. STANFORD UNIVERSITY, Proceedings, tenth workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford Geothermal program, Stanford University, Stanford, California, 1985.
10. FRANK P. INCROPERA, Fundamentos de transferencia de calor, 4a.ed., Prentice Hall, México, 1999

ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN PROBADOS.

11. CEPAL, Informe del programa geotérmico regional, Comisión Europea, única edición 1996.
12. CRAIG, S.B, Geothermal drilling practices at Wairakei, New Zealand paper G/14, 1961.
13. SANDIA NATIONAL LABORATORIES, Prototype geothermic plant, Albuquerque, Nuevo México, USA, 1999.

14. HUNT, A.M, The measurement of borehole discharges, downhole temperatures and pressure, and surface heat flows at Wairakei. Paper G19, 1961.
15. ING. EDUARDO AGUILERA ORTIZ, Experiencias y nuevas opciones para el desarrollo de la energía geotérmica en el Ecuador, Paper, 1996.
16. NEW ZEALAND GOVERNMENT, Nesjavellir, La Central Geotérmica que abastece a Reykjavík de electricidad y agua caliente, paper en la web.
17. ILCE, La geotermia: tetera natural, Departamento de Ciencias, volumen 3.
18. INTERNATIONAL GEOTHERMAL ASSOCIATION, Geothermal plants in USA, 2008.
19. ING. EDUARDO AGUILERA ORTIZ, Estado actual de la energía geotérmica en el mundo y las perspectivas para el Ecuador en los próximos años, Escuela Politécnica del Ejército, 2007.
20. AGUILERA E, Chemical and isotope characteristics of the Chachimbiro geothermal fluids (Ecuador), geothermics 34, 495-517. Elsevier Ltd. Netherlands, 2005.
21. CARLOS CÓRDOVA RIQUELME, Geotérmicas, Apuntes_Me64A.pdf, 5ª, 6ª y 7ª Clase, Depto. Ingeniería Mecánica Universidad de Chile.
22. LUZ A. BARRIOS, Desarrollo de los Recursos Geotérmicos en El Salvador, Ingeniería de Reservorios, Gerencia Producción, web.
23. ICE, El sistema geotermoeléctrico del ICE se desarrolla en las faldas del Volcán Miravalles, ICE, Costa Rica, web.
24. ING. JULIO CANALES, Planta geotérmica, San Jacinto Tizate, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Electrotecnia y Computación (fec), 2008.
25. EMPRESA NICARAGUENSE DE ELECTRICIDAD, Central geotermoelectrica Momotombo, paper, 2008, web.
26. DR. GERARDO HIRIART, A New 100-MW Geothermal Power Project Starts, Operations Near Morelia, Michoacán in Central México, Comisión Federal de Electricidad, México City, México, 2000.
27. DR. EDUARDO IGLESIAS R., M. I. VICTOR ARELLANO G., ING. RODOLFO JOAQUIN TORRES R., Estimación del recurso y prospectiva tecnológica de la geotermia en México, informe IIE/11/3753/I 01/P gerencia

- de geotermia, Instituto de Investigaciones Eléctricas Av. Reforma 113, Colonia Palmira 62490 Cuernavaca, Morelos, México, marzo 2005.
28. EQUIPO DE TRABAJO DE LA ESPE, Línea base ambiental y social para el área geotérmica de Chachimbiro, paper, 2008, web.
29. DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES DEL PROYECTO GEOTÉRMICO MIRAVALLS III, Informe de impactos ambientales y sociales, Proyecto Geotérmico Miravalles III, paper, web.
30. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS Y CENSOS, Documento presentado sobre el Cantón San Miguel de Urcuquí, 2004, web.
31. UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA, Torre de Enfriamiento de Tiro Forzado, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Departamento de Aeronáutica, 1997.
32. 1J. IÑIGUEZ DONOSO, 2A. BARRIGA RIVERA, Calculo y diseño de empaquetadura y ventiladores para una torre de enfriamiento de tiro forzado, 1Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2000. 2Director de Tesis, M.C. en Ingeniería Mecánica, Ph.D. en Ciencias de la Investigación, Universidad de Washington, USA.
33. J. MENCHU IXCAGUIC, Diseño de una torre de enfriamiento para un turbogenerador de 7.5 Mw en el ingenio la unión, Universidad de San Carlos Guatemala, Facultad de Ingeniería Mecánica, Guatemala 1996.
34. MANLIO COVIELLO, financiamiento y regulación de las fuentes de energía nuevas y renovables: el caso de la geotermia, serie medio ambiente y desarrollo 13, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Naciones Unidas, Santiago de Chile, 1998.
35. CÉDRIC NATHANAËL HANCE , Factors Affecting Costs of Geothermal Power Development Document, A Publication by the Geothermal Energy Association for the U.S. Department of Energy, August 2005.

PAGINAS WEB

36. <http://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/34948.pdf> Geothermal plants, ingles, 2008.
37. <http://gmu.gov.ec>. Gobierno Municipal de San Miguel de Urcuquí, español, 2005.

38. <http://www.lageo.com.sv/social.php> LaGeo El Salvador, español, 2007.
39. http://www.sabelotodo.org/aparatos/maquinasvapor.html&usg=__puAlYkmgpqGdUMe0uHGnqfz_C9o=&h=625&w=350&sz=7&hl=es&start=19&um=1&tbid=F5nEUx8Oy7AGdM:&tbnh=136&tbnw=76&prev=/images%3Fq%3Dturbinas%2Bde%2Bvapor%26hl%3Des%26um%3D1 Maquinas de vapor, español, 2008.
40. <http://www.laboraldecordoba.es> Universidad de Cordoba, España, español, 2008.
41. http://www.mhi.co.jp/en/products/category/geothermal_power_plant.html Productos de geotermia por Mitsubishi, ingles, 2009.
42. www.ansaldoenergia.it Productos de geotermia por Ansaldo, ingles, 2009.
43. http://www.gepower.com/prod_serv/products/steam_turbines/en/index.htm Productos de geotermia por General Electric, ingles, 2009.
44. <http://www.fujielectric.com/fecoa/power/> Productos de geotermia por Fuji, ingles, 2009.
45. <http://www.francotosimeccanica.it/steam-turbines.htm> Información sobre turbinas, español, 2009.
46. <http://www.powergeneration.siemens.com/press/press-pictures/simple-cycle-power-plants/> Productos de geotermia por Siemens, ingles, 2009.
47. <http://www.oramat.com/businesses.php?did=25> Productos de geotermia por Ormat, ingles, 2009.
48. http://www.infoindustriaperu.com/articulos_pdf/mineria/metalurgia/005.pdf Estudios sobre geotermia en Perú, español, 2008.
49. <http://pataka.binblogs.com/note/3640/energia-geotermica.html1> Información sobre conceptos de geotermia, español 2009.
50. www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2004/11/19/140175.php Información sobre las nuevas energías, español 2009.
51. <http://www.ubeg.de/downloads/EnergiaGeotermica.pdf> Información sobre conceptos básicos de geotermia, 2008.
52. http://www.edilatex.com/index_archivos/geotermica.pdf Información sobre conceptos básicos de geotermia, 2009.