



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMERICA LATINA
EDICION 2016



TEMA:

Análisis del desempeño de un sistema de remoción de gases no condensables en una planta geotérmica.

PRESENTAN:

Martínez Rivas Abner Alexis.
Morales Aguilar Freddy Daniel.
Portillo Hernández Josué Isaí.

ASESOR:

Ing. Oscar Fernando Cideos Núñez.

CIUDAD UNIVERSITARIA, 14 DE DICIEMBRE DE 2016

Tabla de contenido

1. Resumen	3
2. Introducción	4
3. Hipótesis	4
4. Alcance	4
5. Objetivos	4
6. Marco teórico	5
6.1. Antecedentes de las centrales geotérmicas	5
6.2. Sistemas geotérmicos	5
6.3. Clasificación de los recursos geotérmicos	5
6.4. Eyectores y sistemas de vacío híbrido	5
6.4.1. Eyectores	5
6.4.2. Operación básica de los eyectores	6
6.4.3. Sistemas de vacío híbrido	6
6.4.4. Operación básica de las bombas de vacío de anillo líquido	7
7. Plantas Geotérmicas	8
7.1. Componentes de una planta geotérmica	8
7.2. Especificación de los principales equipos de la planta en estudio	9
7.3. Condición operativa de la planta en estudio	10
8. Gases no condensables	10
8.1. Definición	10
8.2. Tipos de gases presentes en descargas geotérmicas	11
8.3. Efecto de los gases no condensables en plantas geotérmicas	12
8.4. Condiciones de diseño para el condensador y el sistema vacío	13
8.5. Evolución de los gases no condensables en la planta en estudio	14
9. Desarrollo del tema	15
9.1. Análisis del sistema	15
9.2. Potencia mecánica de la bomba de vacío de anillo líquido	20
9.3. Selección de la potencia del motor	21
10. Resultados	23
11. Evaluación Financiera del proyecto	24
12. Conclusiones	26
13. Recomendaciones	26
14. Agradecimientos	27
15. Referencias	28

1. Resumen

Este documento contiene un estudio que compara dos métodos diferentes de remoción de gases no condensables aplicables a centrales geotérmicas a condensación, define una metodología de estudio y compara el rendimiento de ambos métodos; para los cuales, se ha considerado que operan en conjunto con un condensador de mezcla líquido-vapor y un sistema para separación física de líquido-vapor aguas arriba de la turbina de potencia. El primero de estos métodos consiste en un sistema de dos etapas de eyectores de chorro de vapor, este es el caso base del estudio para comparar el rendimiento de la planta con ambos métodos. El segundo, consiste en un sistema híbrido que utiliza una etapa de eyectores de chorro de vapor y una segunda etapa de bomba de vacío de anillo líquido.

El objetivo del presente estudio es comparar la eficiencia de planta y la potencia neta generada que tiene la planta con el actual sistema de vacío eyector-eyector tomando como referencia sus condiciones de diseño, versus, lo que tendría si se reemplaza por un sistema híbrido eyector-bomba de anillo líquido y evaluar la factibilidad económica de realizar el cambio del sistema de vacío.

La metodología de este estudio consistió en realizar un análisis termodinámico con ayuda del programa Python para efectuar un balance de energía en el ciclo de la planta geotérmica bajo las siguientes consideraciones: presión de vacío en el condensador 0.08 bar absolutos y 1% de porcentaje en peso de gases no condensables, este balance de energía se realizó para ambos sistemas de vacío, eyector-eyector y eyector-bomba de vacío de anillo líquido. Posteriormente, se procedió al análisis de los datos para determinar cuál de los dos sistemas de vacío aporta mayores beneficios a la generación neta de la planta, se identificaron también sus ventajas y desventajas.

De los análisis resultó una comparación justa de la potencia neta generada, los beneficios, ventajas, desventajas y eficiencia de planta que se logra con cada una de estas alternativas de remoción de gases no condensables.

2. Introducción.

Las centrales geotérmicas son aquellas que generan energía eléctrica a partir de vapor geotérmico, en general, una turbina de vapor transforma la energía térmica del vapor en energía mecánica, luego un generador eléctrico transforma la energía mecánica en energía eléctrica la cual se manifiesta como corriente alterna cuando se conecta una impedancia entre sus terminales.

La planta en estudio es una central geotérmica “*single flash*” que utiliza una turbina a condensación, idealmente estas turbinas deberían descargar vapor saturado con una calidad mayor al 90% (para evitar problemas de corrosión y erosión en sus componentes) a un condensador que está a una presión menor a la presión atmosférica. No obstante, en la práctica el vapor geotérmico que descarga la turbina lleva consigo cierto porcentaje de gases no condensables que debe ser eliminado del condensador a través de un sistema de vacío, de lo contrario la turbina podría reducir su eficiencia o no operar si se incrementa considerablemente la presión en su descarga.

Desde esta perspectiva el sistema de vacío es un sistema crítico dentro de la operación de la planta porque su desempeño afecta en forma directa la capacidad de generar energía eléctrica eficientemente. Tomando en cuenta lo anterior el presente trabajo se enfoca en comparar el desempeño del ciclo termodinámico de la planta que se obtiene con ambos métodos de remoción de gases no condensables.

3. Hipótesis.

Se plantea como hipótesis para este caso de estudio que un sistema de vacío híbrido del tipo eyector-bomba de anillo líquido logra un mejor desempeño que un sistema eyector-eyector, debido a que al reemplazar la segunda etapa de eyectores por una bomba se tiene una menor demanda en el suministro de vapor lo cual significa un incremento en la eficiencia de planta.

4. Alcance.

El alcance de este proyecto es calcular la eficiencia de planta y la potencia generada con ambos sistemas de vacío, con el fin de conocer con cuál de las dos alternativas se obtiene la mejor eficiencia y la mayor potencia neta generada.

5. Objetivos.

Objetivo general:

- Comparar la eficiencia de planta y la potencia neta generada que tiene una planta geotérmica con un sistema de vacío eyector-eyector versus un sistema híbrido eyector bomba de vacío de anillo líquido.

Objetivos específicos:

- Plantear las condiciones de diseño del sistema de vacío eyector-eyector.
- Plantear las condiciones operativas de la planta.
- Calcular la potencia neta generada, la eficiencia térmica y la eficiencia de segunda ley del ciclo termodinámico de la planta que se obtiene con ambos sistemas de vacío, eyector-eyector y el híbrido eyector bomba de anillo líquido.
- En base a los resultados obtenidos determinar cuál de los dos sistemas de vacío aporta mayores beneficios a la generación neta de la planta y evaluar la factibilidad económica de realizar el cambio del sistema de vacío.

6. Marco teórico.

6.1. Antecedentes de las centrales geotérmicas.

Se estima que el uso de la energía geotérmica con fines industriales se remonta al año 1827 cuando el ingeniero francés François de Larderel ideó el primer sistema capaz de realizar trabajo a partir de la energía térmica del vapor geotérmico, el 4 de julio de 1904 Piero Ginori Conti logró energizar 4 bombillos con el primer generador geotérmico en Larderello, Italia. En 1911 se construyó en ese mismo lugar la primera central geotérmica comercial, desde entonces el uso de la energía geotérmica para generar electricidad se ha fomentado como fuente de energía renovable, estable y respetuosa con el medio ambiente.

6.2. Sistemas geotérmicos

Los sistemas geotérmicos naturales se encuentran donde coexisten: un cuerpo de roca caliente, fluido y permeabilidad. Los de mayor interés están ubicados en zonas de obducción y subducción donde el gradiente geotérmico puede ser significativamente más alto que el valor promedio.

6.3. Clasificación de los recursos geotérmicos.

La clasificación más aceptada para los sistemas geotérmicos es la siguiente:

- Sistemas de alta y baja temperatura/entalpía.
 - Alta Temperatura: mayor a 150 °C.
 - Baja Temperatura: menor a 150 °C.
 - Algunos autores proponen la categoría de temperatura intermedia (120-180C).
- Sistemas volcánicos e hidrotermales.
 - En placas convergentes.
 - En placas divergentes.
- Sistemas de líquido o vapor dominante.
 - Líquido dominante: El fluido del reservorio es mayoritariamente agua líquida.
 - Vapor dominante: El fluido del reservorio es mayoritariamente vapor.

6.4. Eyectores y sistemas de vacío híbrido.

6.4.1. Eyectores.

Un eyector no es más que una combinación de tobera con un difusor, acoplado convenientemente en un mismo equipo (Castillo, J., 2016). Ordinariamente cuando uno se refiere a los aparatos de chorro se acostumbra usar el término "eyector" que cubre todos los tipos de bombas de chorro que no cuentan con partes móviles, que utilizan fluidos en movimiento bajo condiciones controladas y que descargan a una presión intermedia entre las presiones del fluido motor y de succión. El eyector a chorro de vapor es el aparato más simple que hay para extraer el aire, gases o vapores de los condensadores y de los equipos que operan a vacío en los procesos industriales. Es un tipo simplificado de bomba de vacío o compresor, sin partes móviles, como válvulas, pistones, rotores, etc. Su funcionamiento está dado por el principio de conservación de la cantidad de movimiento de las corrientes involucradas. Los eyectores o bombas de chorros, son máquinas cuyo trabajo se basa en la transmisión de energía por impacto de un chorro fluido a gran velocidad, contra otro fluido en movimiento o en reposo, para proporcionar una mezcla de fluido a una velocidad moderadamente elevada, que luego disminuye hasta obtener una presión final mayor que la inicial del fluido de menor velocidad. Los eyectores se emplean muy comúnmente para extraer gases de los espacios donde se hace vacío, por ejemplo, en los condensadores, en los sistemas de evaporación, en torres de destilación al vacío y en los sistemas de refrigeración, donde los gases extraídos son generalmente no condensables, tales como el aire.

6.4.2. Operación básica de los eyectores.

Un fluido motivador de alta presión entra en 1 y se expande a través de la boquilla convergente-divergente en 2; el fluido aspirante entra en 3 y se mezcla con el fluido motivador en la cámara de mezcla 4; luego los dos se recompensarán a través del difusor hasta 5, ver ilustración 1.

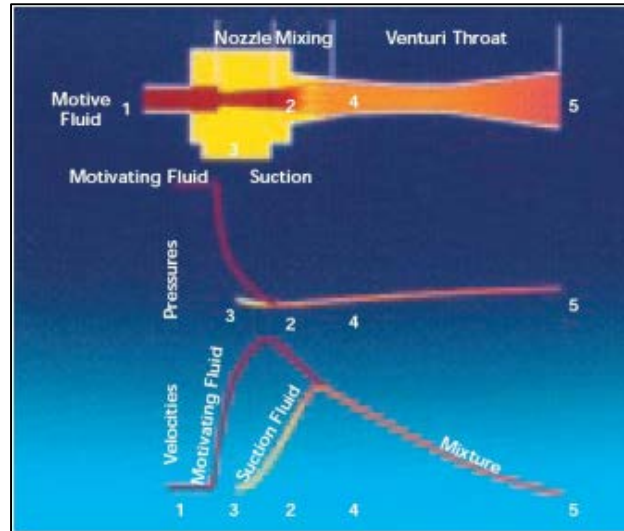


Ilustración 1. Esquema básico del funcionamiento de un eyector.

Ventajas

- Son de diseño simple con gran flexibilidad, fáciles de construir, ocupan poco espacio, son fáciles de manejar, confiables.
- Su costo de mantenimiento es bajo (no necesita lubricación, ni se desgasta)
- No tienen partes móviles como válvulas, pistones, rotores, etc. Además las sustituciones de piezas o partes son poco frecuentes (los más comunes son de toberas de acero inoxidable, los materiales cambian según su uso).
- Bajo costo de servicio u operación.
- No necesita cimentación y puede ser sujetado conectando las tuberías.

Desventajas

- Su costo operacional es relativamente alto debido al consumo de fluido motor, generalmente vapor.
- Sobre base anual el costo de operación es generalmente mayor que el costo inicial del equipo, de aquí que su rendimiento económico sea bajo.
- Tienen una baja eficacia mecánica y falta de flexibilidad para las variaciones de las condiciones de operación.

6.4.3. Sistemas de vacío híbrido.

Consisten en una combinación de eyectores de vapor operando en serie, seguidos de un condensador donde se condensan los vapores y se reduce de esta forma la cantidad de vahos a eliminar por la bomba de vacío que comprime los gases no condensables hasta la presión atmosférica. Se pueden diseñar y fabricar de acuerdo al rango de vacío deseado, composición de gases y disponibilidades de agua y vapor. El sistema de vacío híbrido generalmente está compuesto por un eyector, un condensador intermedio y una bomba de vacío de anillo líquido con un circuito cerrado para el sello líquido, ver Ilustración 2.

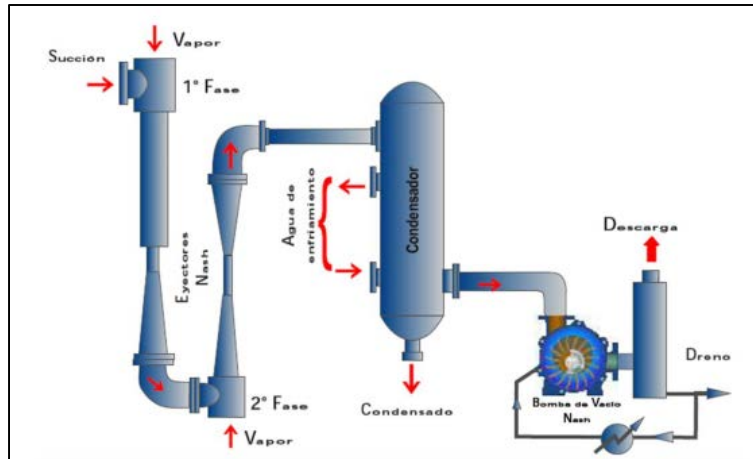


Ilustración 2. Esquema de un sistema de vacío híbrido.

6.4.4. Operación básica de las bombas de vacío de anillo líquido.

Las bombas de vacío son equipos que tienen como función remover gases de un volumen hermético formando un vacío parcial, su fuente motriz es un motor eléctrico.

Principio de funcionamiento: Los gases no condensables son aspirados a través del orificio de succión de la bomba hacia el interior de la cámara de compresión donde quedan atrapados entre los alabes que giran excéntricamente con respecto al anillo líquido que se forma en la periferia de la cámara, dicho anillo sirve como sello entre la carcasa y los gases. La compresión se produce a medida que gira el impulsor forzando a los gases a comprimirse contra el anillo líquido provocando así, un cambio gradual en el volumen de los gases hasta que son expulsados a través del orificio de descarga mezclados con parte de líquido que debe ser continuamente rellenado para el buen funcionamiento de la bomba. Es muy importante mencionar que el líquido suministrado a las bombas debe estar limpio y libre de partículas sólidas, ilustración 3.

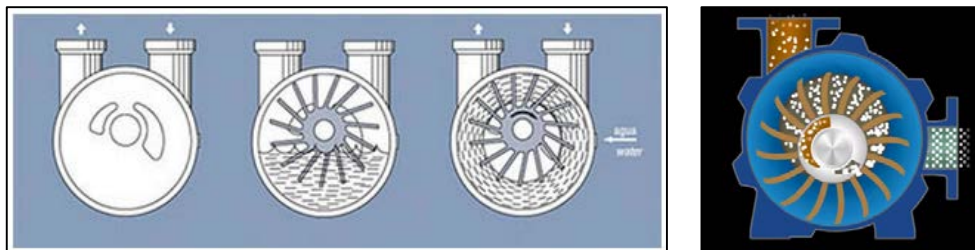


Ilustración 3. Bomba de anillo líquido.

Ventajas

- Los sistemas híbridos reducen el consumo de vapor, asegurando una máxima eficiencia de operación.
- Estudios realizados adecuadamente pueden reducir el consumo de vapor y optimizar los costos operacionales en la sustitución de antiguos sistemas existentes.
- Los Sistemas de vacío híbridos son altamente flexibles, proporcionando la obtención de elevados niveles de vacío (1-2 mmHg abs) y grandes volúmenes de gas aspirado.
- Reducidos costes de mantenimiento.

Desventajas:

- Su costo de inversión inicial es más alto.
- Requiere de obras civiles para cimentaciones.
- Tiene partes móviles sensibles al desgaste.
- Susceptible a vibraciones.

7. Plantas Geotérmicas.

7.1. Componentes de una planta geotérmica.

A continuación, una descripción general de los componentes principales de una planta geotérmica:

- a) Turbinas de vapor: Las turbinas de vapor son máquinas que desarrollan par y potencia en el eje como resultado de la variación de la cantidad de movimiento del fluido que pasa a través de ellas, dicho fluido en este caso es vapor.
- b) Generador eléctrico: es una máquina que convierte energía mecánica en energía eléctrica cuando se hace girar mecánicamente el campo (electroimán de corriente continua dispuesto sobre el rotor) dentro de la armadura (bobinas del estator) para producir un campo magnético giratorio y en consecuencia crear un cambio del entorno magnético en el que están sumergidos los devanados de armadura. Dicho cambio, inducirá entonces una fuerza electromotriz en los devanados de armadura obteniendo así un voltaje trifásico en los terminales del generador, este sistema está basado en la ley de Faraday.
- c) Condensador: es el foco frío o sumidero de calor del sistema, su función principal es condensar el vapor que sale de la turbina mediante contacto directo de vapor y agua fresca lo que permite una condensación eficiente y enfriamiento de los gases no condensados. Vienen equipados por una o más boquillas de aspersión que crean una gran superficie inter-facial que favorece el contacto y la transferencia de calor.
- d) Sistema de remoción de gases no condensables: hay tres tipos de sistemas comúnmente utilizados en geotermia los cuales son: eyectores, eyector-bomba de anillo líquido y eyector-compresor. Para todos estos su función principal es extraer los gases no condensables del condensador, crear y mantener el vacío necesario para que la turbina de vapor pueda lograr la mejor eficiencia de trabajo.
- e) Torre de enfriamiento: es una instalación cuya función es extraer calor del condensado (agua caliente) proveniente del condensador, las hay de tiro natural y tiro mecánico, estas últimas se subdividen en tiro inducido y tiro forzado. El intercambio de calor se produce cuando el condensado cede calor al aire fresco del ambiente.
- f) Separador ciclónico: En geotermia el separador ciclónico es el equipo que se utiliza para separar el fluido bifásico (mezcla de vapor y salmuera), la densidad del fluido, los efectos rotación y la gravedad son aprovechados para separar las fases líquido y vapor. El fluido bifásico entra al separador ciclónico en forma tangencial y a alta velocidad de forma que la fase líquida por gravedad desciende hacia el fondo en forma helicoidal, en cambio, la fase vapor por densidad asciende a la parte superior y por diferencia de presión fluye hacia fuera del separador.

- g) Sistemas de acarreo: en un campo geotérmico son todos aquellos equipos superficiales y tuberías que es necesario instalar para conducir, regular y controlar el flujo que sale de los pozos, separar el flujo bifásico en agua y vapor, retener sólidos, silenciar los fluidos cuando el pozo es descargado a la atmósfera, así como también, proteger los equipos contra sobrepresiones.
- h) Equipos auxiliares: son todos los equipos que complementan el proceso y que son necesarios para que los equipos principales como la turbina o el generador puedan operar normalmente.
- i) Sistema de instrumentación y control: son todos aquellos dispositivos, sensores y software encargados de vigilar, proteger y/o controlar parámetros importantes de otros equipos o sistemas como por ejemplo la turbina , el generador o el sistema de gobernación electrohidráulico.
- j) Pozo productor: Pozo productor de fluido geotérmico.
- k) Pozo re-inyector: Pozo en el que los fluidos se inyectan en lugar de producirse, siendo el objetivo principal mantener la presión de yacimiento.

7.2. Especificación de los principales equipos de la planta en estudio.

A continuación, la especificación técnica de los componentes principales de la planta en estudio:

- a) Turbina: es una turbina de reacción, opera a una velocidad de 3600 rpm, su consumo específico es de 2.17 kg/s de vapor a 150 °C, su capacidad nominal es de 35000 kW, presión de entrada 4.7 bar absolutos, condición de vacío 0.08 bar absolutos, eficiencia Isoentrópica 0.87.
- b) Generador: es un generador síncrono sin escobillas, su capacidad nominal es de 45000 kVA, voltaje de salida 13800 voltios, amperaje 1883 A, 3 fases, velocidad 3600 rpm, factor de potencia 0.8, frecuencia 60 Hz, 2 polos, eficiencia 0.94.
- c) Condensador: es de tipo mezcla, su capacidad de flujo másico es de 74.63 kg/s, presión de recámara 0.08 bar absoluto, flujo de agua de circulación 14958 gpm a 30.2 °C.
- d) Sistema de remoción de gases no condensables: Es un arreglo de dos etapas en serie al 100%, eyector-eyector, diseñado para extraer el 1% de porcentaje en peso de gases no condensables, el sistema de remoción de gases debe permitir mantener la presión de operación del condensador en 0.08 bar absoluto. Los gases son dirigidos hacia la torre de enfriamiento para ser emitidos al ambiente a través de la chimenea de la Torre.
- e) Torre de enfriamiento. Condiciones de diseño: flujo de agua de enfriamiento 14958 gpm, temperatura de entrada 40.6 °C, temperatura de salida 30.2 °C, temperatura de bulbo húmedo 26,5 °C, pérdidas por arrastre 0.001%, perdidas por evaporación y deriva 230 m³/h a una humedad relativa del 80%, elevación 186 msnm.

7.3. Condición operativa de la planta en estudio.

A continuación se presenta un diagrama esquemático de la planta con los valores promedios de operación durante el año 2016, ver ilustración 4.

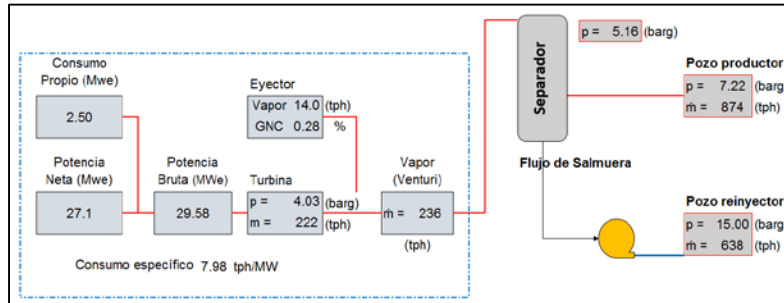


Ilustración 4. Condiciones operativas de la planta en estudio.

La siguiente tabla muestra eventos de disparo de la turbina por alta presión en la recámara del condensador principal.

Planta X -- Reporte de Eventos							
Evento	Fecha	Inicio	Finalizo	Duración	Valor de alarma	Valor de disparo	Comentarios
4	20-Jan-16	08:51	09:18	0.5	0.26	0.36	Alta presión en recámara del condensador principal.
3	20-may-16	23:38	23:59	0.4	0.26	0.36	Alta presión en recámara del condensador principal.
2	21-may-16	00:00	00:05	0.1	0.26	0.36	Alta presión en recámara del condensador principal.
1	15-jul-16	16:34	17:25	0.9	0.26	0.36	Alta presión en recámara del condensador principal.

Tabla 1. Disparos de turbina ocurridos en 2016.

8. Gases no condensables.

La utilización del recurso geotérmico para la generación de energía está siempre relacionada con la presencia de gases no condensables como componentes naturales del vapor, gases tales como el bióxido de carbono, el ácido sulfhídrico, el metano y otros forman parte de los fluidos geotérmicos de alta temperatura. Estos gases generalmente salen del pozo productor en concentraciones muy pequeñas y mezclados con el vapor recorren todo el sistema de acarreo hasta pasar por la turbina y finalmente acumularse en el condensador, de donde deben ser eliminados para mejorar la eficiencia termodinámica de las centrales geotérmicas.

8.1. Definición.

En el contexto de plantas geotérmicas los gases no condensables son aquellos que tienen un punto de ebullición tan bajo que para lograr su cambio de estado habría que disminuir significativamente su temperatura o aumentar mucho la presión, de tal manera que en los rangos de temperatura y presión a los que operan estas plantas no se espera su

condensación. Es decir, permanecerán siempre en forma de gas y a diferencia del vapor geotérmico son incapaces de condensarse dentro del condensador principal.

8.2. Tipos de gases presentes en descargas geotérmicas.

Los gases no condensables son todos los demás gases diferentes al H₂O que están presentes en el vapor geotérmico invariablemente de su origen, en sistemas volcánicos los gases no condensables son de origen magmático en cambio, en sistemas hidrotermales estos se originan a partir de las reacciones químicas entre el agua y la roca. La proporción de gases no condensables varía ampliamente de un campo a otro, generalmente en rangos de 0.1 a 10% del volumen total de la fase vapor; de igual forma la composición y concentración de estos gases varía en dependencia de su origen, sin embargo los siguientes gases, con vapor de agua, están invariablemente presentes en las descargas geotérmicas tanto de manifestaciones naturales como de pozos geotérmicos: CO₂, H₂S, NH₃, N₂, H₂, CH₄.

En sistemas hidrotermales el más importante de los gases no condensables es el CO₂ esto se debe a que generalmente equivale al 90% del contenido total de estos gases, luego le siguen el H₂S, el SO₂ y concentraciones menores gases como el HCl, HF, CH₄, N₂, NH₃, gases nobles y otros. En cambio, en sistemas volcánicos/magmáticos los gases más significativos son SO₂, HCl, HF y otros. Otra forma de agrupar los gases más significativos en sistemas geotérmicos es la siguiente:

- Relativamente solubles en agua: NH₃, H₂S, CO₂.
- Relativamente menos solubles en agua: CH₄, H₂, N₂, Ar, He
- Sistemas de alta temperatura: CO₂, CH₄, H₂.
- Sistemas de baja temperatura: están dominados por N₂.
- Contaminación por aire: alto contenido de O₂.

La siguiente tabla presenta los valores promedios de gases no condensables encontrados en algunos campos geotérmicos en el mundo.

Campo Geotérmico	% de GNC
Wairakei	de 0.35% a 0.5%
The Geysers	de 0.6% a 1.0%
Matsukawa	cerca de 1.1%
Cerro Prieto	cerca de 1.25%
Larderello	de 4.5% a 5%
Germencik	10%

Tabla 2. Porcentaje en peso de gases no condensables encontrados en algunos campos geotérmicos en el mundo.

En cuanto a la composición química de los gases no condensables presentes en el vapor geotérmico según Nicholson (1993) esta puede ser afectada por los siguientes factores:

- Temperatura y presión del reservorio.
- Solubilidad del gas.
- Coeficiente de distribución del gas en la fase líquida y gaseosa.
- Temperatura y presión de la separación de gases (ebullición).
- Proporción del vapor respecto a los fluidos en el reservorio.

- Química del vapor producido por la ebullición del fluido en el reservorio.
- Reacciones en el vapor mientras asciende (oxidación, interacciones con la roca).

8.3. Efecto de los gases no condensables en plantas geotérmicas.

Los efectos más comunes que ocasionan los gases no condensables son: la corrosión de tuberías, la pérdida de vacío y reducen la eficiencia de la turbina y aumentan considerablemente los costos de los sistemas de extracción de gases.

Con la presencia de distintos gases no condensables en el vapor geotérmico es de esperar que se presente corrosión en varios lugares de la instalación geotérmica debido a la naturaleza corrosiva de algunos de esos gases, debe ponerse especial atención en la metalurgia de todos los componentes tomando en consideración las propiedades físicas y químicas de los gases que estarán en contacto con ellas. En ocasiones es necesario aplicar tratamientos como inhibidores de corrosión para proteger las tuberías.

Los gases no condensables también afectan el rendimiento del condensador principal, si se tiene en cuenta que la transferencia de calor en un condensador se produce por el contacto directo entre las partículas de vapor y agua refrigerante a diferentes temperaturas y que en líquidos y gases solo se da la conducción pura si se excluye la posibilidad de convección entonces, la ley de Fourier afirma que la transferencia de calor está determinada por $Q = kA(\Delta T)$; en donde la superficie de contacto (A) ha sido seleccionada para rechazar la cantidad adecuada de calor (Q) en función de un coeficiente de transferencia de calor (k) y la diferencia de temperatura entre la temperatura del aire del medioambiente y el agua refrigerante (ΔT).

Dado que el condensador es un espacio idealmente hermético un gas no condensable se mantendrá en forma de vapor y no fluirá al exterior en lugar de eso permanecerá atrapado dentro del mismo. Esta situación provocará dos cosas: El espacio ocupado por el gas no condensable no estará disponible para que el agua refrigerante y el vapor puedan mezclarse y completar la transferencia de calor, de modo que, la superficie de contacto "A" dentro del condensador se reduce. Y en consecuencia a lo anterior el coeficiente de transferencia de calor total en el interior del condensador también se reduce. En otras palabras, al disminuir la transferencia de calor la temperatura dentro del condensador tenderá a incrementarse lo cual significa que la presión interna del condensador aumentará desmejorando la presión de vacío, esta situación no es deseable porque al aumentar la presión del condensador podría aparecer una contrapresión a la salida de la turbina opuesta a su sentido de rotación; por otra parte a mayor concentración de gases no condensables se obtiene una entalpía de trabajo menor con respecto al vapor de agua puro que al final resultará en una pérdida de eficiencia de la turbina.

El sistema de remoción de gases no condensables o sistema vacío se compone de eyectores, bombas de vacío de anillo líquido o sistemas híbridos con ambas tecnologías, en plantas geotérmica con la tecnología Tipo Flash generalmente no se encuentra más de 2% de gases no condensables en el vapor y los gases pueden ser manejados sin ningún problema con eyectores, sin embargo, en aquellos casos en los que se tiene mayores proporciones es recomendable emplear tecnologías híbridas como eyector-bomba de anillo líquido o eyector-compresor para evitar factores excesivos de seguridad que desperdicien el recurso y minimizar el uso de las fuentes de vapor, aunque la fuente de energía geotérmica es renovable, no es infinita y se debe utilizar lo más eficientemente posible. Sin embargo las tecnologías híbridas capaces de manejar altas proporciones de gases representan un mayor costo de inversión inicial.

8.4. Condiciones de diseño para el condensador y el sistema vacío.

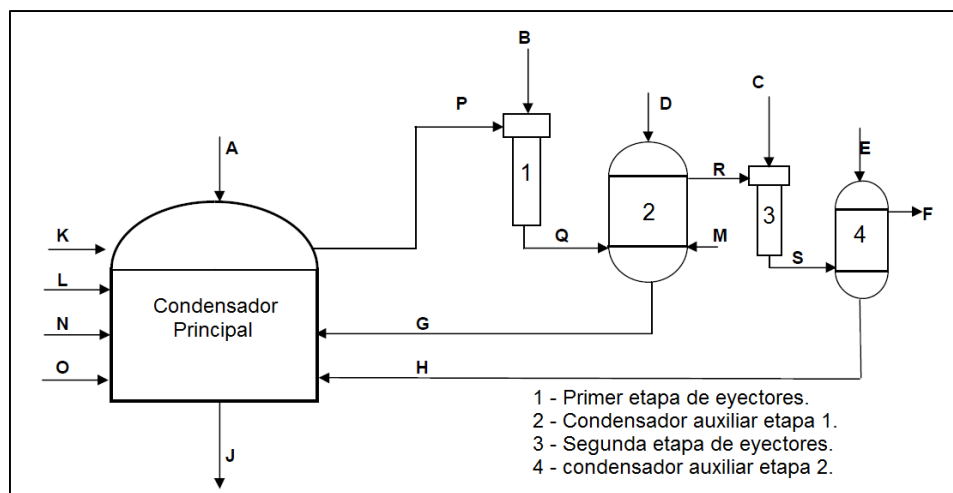


Ilustración 5. Diagrama esquemático del sistema de remoción de gases no condensables.

La siguiente tabla muestra las condiciones de diseño para el condensador y el sistema de remoción de gases no condensables de la planta.

Item	Descripción de flujos	Flujos				Total		
		Vapor tph	Líquido tph	Gases NC tph	Aire tph	Entalpía kJ/kg	Presión kPaa	Temp. °C
A	Entrada principal de vapor.	238.2	28.3	2.16	0.0254	2,323.00	8.30	42.14
B	Vapor motriz de etapa 1.	6.6	n/a	0.05	n/a	2,747.47	500.00	151.9
C	Vapor motriz de etapa 2.	7.8	n/a	0.06	n/a	2,747.47	500.00	151.9
D	Agua de enfriamiento.	n/a	503.5	n/a	0.0068	361.69	149.58	30.20
E	Agua de enfriamiento.	n/a	494.4	n/a	0.0064	361.69	149.58	30.20
F	Emisión a la atmósfera.	0.0544	n/a	2.27	0.3543	n/a	107.0	31.87
G	Dreno.	n/a	511.7	n/a	n/a	167.47	n/a	40.00
H	Dreno.	n/a	502.4	n/a	n/a	167.54	n/a	40.00
J	Dreno principal.	n/a	14399.7	n/a	n/a	169.70	8.16	40.54
K	Agua de enfriamiento.	n/a	10,501	n/a	0.2050	126.58	42.74	30.20
L	Viene de sistemas auxiliares.	n/a	2,608	n/a	0.0508	126.58	42.74	30.20
M	Dreno	0.19	n/a	n/a	0.06	2,599.07	30.48	53.89
N	Viene de sistemas auxiliares.	0.34	n/a	n/a	n/a	2,579.20	8.90	43.20
O	Viene de sistemas auxiliares.	n/a	11.2	n/a	n/a	180.90	8.90	43.20
P	Succión de GNC Etapa 1.	1.588	n/a	2.160	0.281	n/a	7.96	31.87
Q	Descarga de GNC Etapa 1.	8.143	n/a	2.209	0.281	n/a	30.82	97.89
R	Succión de GNC Etapa 2.	0.211	n/a	2.209	0.348	n/a	30.48	31.87
S	Descarga de GNC Etapa 2.	7.909	n/a	2.268	0.348	n/a	107.35	118.89

Tabla 3. Descripción del condensador y el sistema de remoción de GNC.

8.5. Evolución de los gases no condensables en la planta en estudio.

La siguiente tabla presenta las mediciones de gases no condensables que se han realizado durante la operación de la planta, desde mayo 2012 a Junio 2016, los gases presentes en el vapor geotérmico son los siguientes: He, H₂, Ar, O₂, N₂, CH₄, CO, H₂S, NH₃.

A continuación se presentan los valores medidos:

Nombre	Fecha	Porcentaje de GNC
Planta X	05/03/2012	0.45
Planta X	16/08/2012	0.53
Planta X	05/09/2012	0.55
Planta X	30/11/2012	0.43
Planta X	01/03/2013	0.44
Planta X	02/06/2013	0.52
Planta X	13/08/2014	0.39
Planta X	03/10/2014	0.39
Planta X	26/01/2015	0.37
Planta X	23/06/2015	0.27
Planta X	28/08/2015	0.17
Planta X	26/11/2015	0.32
Planta X	17/02/2016	0.32
Planta X	09/06/2016	0.28

Tabla 4. Evolución de los gases no condensables en planta geotérmica en estudio.

El siguiente grafico presenta la evolución y tendencia de los gases no condensables en la planta en estudio.

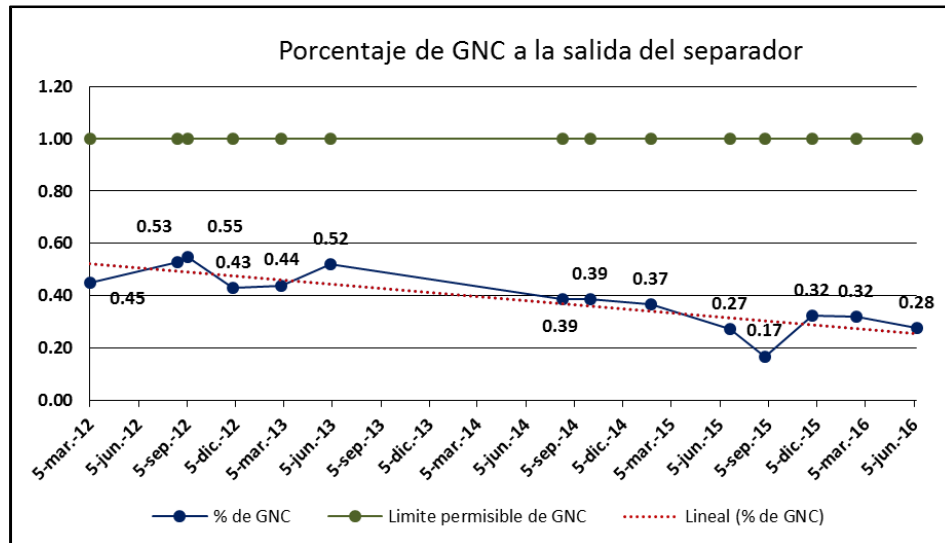


Gráfico 1. Evolución y tendencia de los gases no condensables de la planta en estudio.

9. Desarrollo del tema.

9.1. Análisis del sistema.

El análisis realizado consiste básicamente en calcular la generación neta y la eficiencia de utilización de la planta tanto para el actual sistema de extracción de gases NC constituido por dos etapas de eyectores como para un sistema híbrido eyector bomba de anillo líquido, con el fin de comparar estos valores y determinar cuál de las dos alternativas aporta mayor eficiencia al sistema. En la ilustración 6 se puede apreciar el esquema que representa planta en estudio.

- a) Planta single flash con sistema de vacío eyector-eyector.

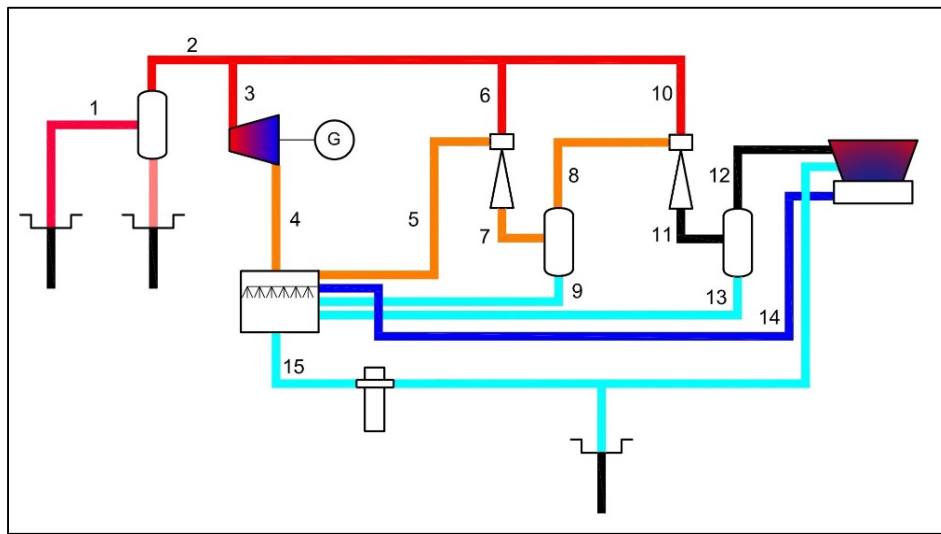


Ilustración 6. Esquema de la planta con sistema de vacío de dos etapas de eyectores.

Propiedades termodinámicas en cada uno de los puntos de interés, las cuales fueron calculadas con el programa Python.

- **Punto 1.** Entrada al separador ciclónico.

Variables conocidas a partir de TFT:

$$\dot{m}_1 = 285.86 \frac{Kg}{s} \quad x_1 = 0.27 \quad h_1 = 1265 \frac{KJ}{Kg}$$

Parámetros determinados:

$$P_1 = 7.528 \text{ bara} \quad T_1 = 167.9 \text{ }^\circ\text{C} \quad s_1 = 3.28 \text{ KJ}/(\text{Kg} \cdot \text{ }^\circ\text{K})$$

- **Punto 3.** Condiciones a la entrada de la turbina.

Variables conocidas:

$$\dot{m}_3 = 66.17 \frac{Kg}{s} \quad T_3 = 151.9 \text{ }^\circ\text{C} \quad P_3 = 5 \text{ bara} \quad x_3 = 1$$

Parámetros determinados:

$$h_3 = 2748.11 \frac{KJ}{Kg} \quad s_3 = 6.8207 KJ/(Kg * ^\circ K)$$

- **Punto 4.** Condiciones a la salida de la turbina.

Variables conocidas:

$$\eta_s = 0.87 \quad \dot{m}_4 = \dot{m}_3 \quad T_4 = 40 \text{ } ^\circ C \quad P_4 = 0.083 \text{ bara}$$

Parámetros determinados:

$$h_4 = 2268.70 \frac{KJ}{Kg} \quad x_4 = 0.8714$$

- **Punto 6.** Condiciones a la entrada del eyector etapa 1.

Variables conocidas:

$$\dot{m}_6 = 1.847 \frac{Kg}{s} \quad P_6 = 5 \text{ bara} \quad T_6 = 151.9 \text{ } ^\circ C.$$

- **Punto 10.** Condiciones a la entrada del eyector etapa 2.

Variables conocidas:

$$\dot{m}_{10} = 2.38 \frac{Kg}{s}, \quad P_{10} = 5 \text{ bara} \quad T_{10} = 151.9 \text{ } ^\circ C.$$

- **Punto 0.** Condiciones del ambiente.

Variables conocidas:

$$T_{amb} = 35 \text{ } ^\circ C \quad P_{atm} = 0.99 \text{ bara},$$

Parámetros determinados:

$$h_0 = 146.7 \frac{KJ}{Kg} \quad s_0 = 0.5051 KJ/(Kg * ^\circ K)$$

Ahora con los datos obtenidos en cada uno de los puntos obtendremos los valores de:

- Potencia mecánica de la turbina
- Generación bruta.
- Generación neta.
- Eficiencia térmica
- Eficiencia térmica según la segunda ley
- Calor de entrada

Potencia mecánica de la turbina:

$$\dot{W}_{Turbina} = \dot{m}_4 * (h_3 - h_4) \quad \text{Ecuación 1}$$

Sustituyendo valores en ecuación 1, tenemos:

$$\dot{W}_{Turbina} = 66.16 \frac{Kg}{s} * \left(2748.11 \frac{KJ}{Kg} - 2268.70 \frac{KJ}{Kg} \right) = 31717.7656 \text{ kW}$$

Potencia bruta en función de la eficiencia del generador:

$$\dot{W}_{Salida} = \dot{W}_{Entrada} * n_{Gen} \quad \text{Ecuación 2}$$

Sustituyendo valores en ecuación 2, tenemos:

$$\dot{W}_{Salida} = 31717.7656 \text{ kW} * 0.94 = 29814.699 \text{ kW}$$

Potencia neta:

$$\dot{W}_{Neta} = \dot{W}_{Salida} - \dot{W}_{Consumo\ propio} \quad \text{Ecuación 3.}$$

Sustituyendo valores en ecuación 3, tenemos

$$\dot{W}_{Neta} = 29814.699 \text{ kW} - 2500 \text{ kW} = 27314.699 \text{ kW}$$

Eficiencia térmica:

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{turbina}}{\dot{m}_1 * h_1} \quad \text{Ecuación 4}$$

Sustituyendo valores en ecuación 4, tenemos:

$$\eta_t = \frac{31717.7656 \text{ kW}}{285.86 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 1265 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}} = 0.0877$$

Eficiencia térmica de segunda ley:

$$\eta_{2.Ley} = \frac{\dot{W}_{turbina}}{\dot{m}_1 * ((h_1 - h_0) - (T_0 + 273.15) * (s_1 - s_0))} \quad \text{Ecuación 5}$$

Sustituyendo valores en ecuación 5, tenemos:

$$\eta_{2.Ley} = \frac{31717.7656 \text{ kW}}{285.86 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * \left[\left(1265 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 146.7 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right) - (35 + 273.15) * \left(3.28 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{K}} - 0.5051 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{K}} \right) \right]} = 0.4215$$

Calor de entrada:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{m}_1 * h_1 \quad \text{Ecuación 6}$$

Sustituyendo valores en ecuación 6, tenemos:

$$\dot{Q}_{entrada} = 285.86 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 1265 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 361612.9 \text{ kW}$$

b) Planta single flash con sistema de vacío eyector-bomba de anillo líquido.
 En la ilustración 7 se puede apreciar el esquema del ciclo de una planta single flash con un sistema de extracción de gases híbrido constituido por una etapa de eyector y otra de bomba de anillo líquido.

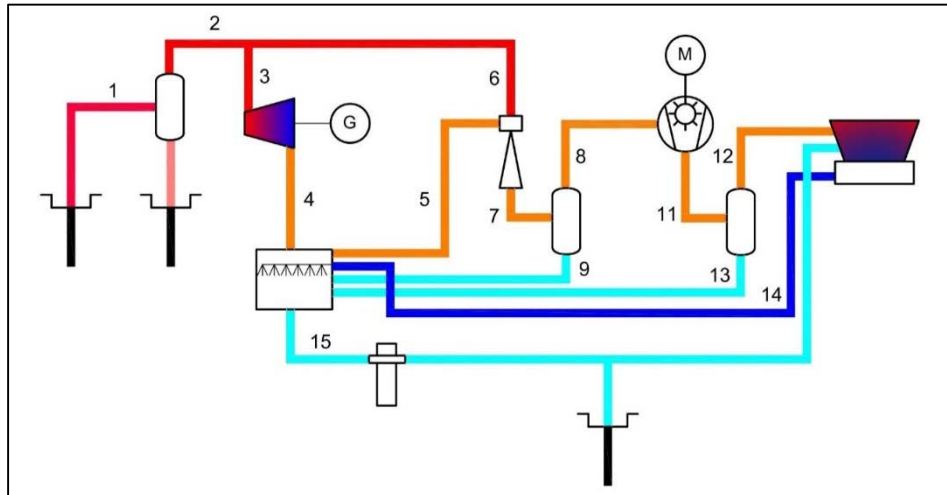


Ilustración 7. Esquema de la planta con sistema de vacío eyector bomba de anillo líquido.

Propiedades termodinámicas en cada uno de los puntos de interés calculadas con el programa Python.

- **Punto 1.** Entrada al separador ciclónico.

Variables conocidas:

$$\dot{m}_1 = 285.86 \frac{Kg}{s} \quad x_1 = 0.27 \quad h_1 = 1265 \frac{KJ}{Kg}$$

Parámetros determinados:

$$P_1 = 7.528 \text{ bara} \quad T_1 = 167.9 \text{ } ^\circ C \quad s_1 = 3.28 \text{ KJ}/(Kg * ^\circ K)$$

- **Punto 3.** Condiciones a la entrada de la turbina.

Variables conocidas:

$$\dot{m}_3 = (66.1 + 2.16) \frac{kg}{s} = 68.26 \frac{kg}{s} \quad T_3 = 151.9 \text{ } ^\circ C \quad P_3 = 5 \text{ bara} \quad x_3 = 1$$

Parámetros determinados:

$$h_3 = 2748.11 \frac{KJ}{Kg} \quad s_3 = 6.8207 \text{ KJ}/(Kg * ^\circ K)$$

- **Punto 4.** Condiciones a la salida de la turbina;

Variables conocidas:

$$\eta_s = 0.87 \quad \dot{m}_4 = \dot{m}_3 \quad T_4 = 40 \text{ } ^\circ C \quad P_4 = 0.083 \text{ bara,}$$

Parámetros determinados:

$$h_4 = 2268.70 \frac{KJ}{Kg} \quad x_4 = 0.8714$$

- **Punto 6.** Condiciones a la entrada del eyector, etapa 1.

Variables conocidas:

$$\dot{m}_6 = 1.847 \frac{Kg}{s}, \quad P_6 = 5 \text{ bara} \quad T_6 = 151.9 \text{ } ^\circ C.$$

- **Punto 0.** Condiciones del ambiente.

Variables conocidas:

$$T_{amb} = 35 \text{ } ^\circ C \quad P_{atm} = 0.99 \text{ bara}$$

Parámetros determinados:

$$h_0 = 146.7 \frac{KJ}{Kg} \quad s_0 = 0.5051 \text{ KJ/Kg} \cdot ^\circ K$$

- **Punto 8.** Entrada de la bomba de anillo líquido.

$$T_8 = 29.81 \text{ } ^\circ C \quad \dot{m}_8 = 0.7616 \frac{Kg}{s} \quad h_8 = 656.06 \frac{KJ}{Kg}$$

- **Punto 11.** Condiciones a la salida de la bomba.

$$T_{11} = 173.65 \text{ } ^\circ C \quad \dot{m}_{11} = \dot{m}_8 \quad h_{11} = 797.73 \frac{KJ}{Kg}$$

Ahora con los datos obtenidos en cada uno de los puntos obtendremos los valores de:

- Potencia mecánica de la turbina
- Eficiencia térmica
- Eficiencia térmica según la segunda ley
- Trabajo de la bomba

Potencia mecánica de la turbina:

$$\dot{W}_{Turbina} = \dot{m}_4 * (h_3 - h_4) \quad \text{Ecuación 1}$$

Sustituyendo valores en ecuación 1, tenemos:

$$\dot{W}_{Turbina} = 68.33 \frac{Kg}{s} * (2748.11 \frac{KJ}{Kg} - 2268.70 \frac{KJ}{Kg}) = 32758.0853 \text{ kW}$$

Potencia bruta en función de la eficiencia del generador:

$$\dot{W}_{Salida} = \dot{W}_{Entrada} * n_{Gen} \quad \text{Ecuación 2}$$

Sustituyendo valores en ecuación 2, tenemos:

$$\dot{W}_{Salida} = 32758.0853 \text{ kW} * 0.94 = 30792.600 \text{ kW}$$

Potencia mecánica de la bomba

$$\dot{W}_{Bomba} = \dot{m}_8 * (h_{11} - h_8) \quad \text{Ecuación 7}$$

Sustituyendo valores en ecuación 7, tenemos:

$$\dot{W}_{Bomba} = 0.78575 \frac{Kg}{s} * (797.73 \frac{KJ}{Kg} - 656.06 \frac{KJ}{Kg}) = 111.326 \text{ kW}$$

Potencia neta:

$$\dot{W}_{Neta} = \dot{W}_{Salida} - \dot{W}_{Consumo\ propio} - \dot{W}_{Motor\ de\ la\ Bomba} \quad \text{Ecuación 8}$$

Sustituyendo valores en ecuación 8, tenemos

$$\dot{W}_{Neta} = 30792.600\ kW - 2500\ kW - 120\ kW = 28184.71\ kW$$

Eficiencia térmica:

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{turbina}}{\dot{m}_1 * h_1} \quad \text{Ecuación 4}$$

Sustituyendo valores en ecuación 4, tenemos:

$$\eta_t = \frac{32758.0853\ kW}{285.86\ \frac{Kg}{s} * 1265\ \frac{KJ}{Kg}} = 0.0905$$

Eficiencia térmica de segunda ley:

$$\eta_{2.Ley} = \frac{\dot{W}_{turbina}}{\dot{m}_1 * ((h_1 - h_0) - (T_0 + 273.15) * (s_1 - s_0))} \quad \text{Ecuación 5}$$

Sustituyendo los valores en ecuación 5, tenemos:

$$\eta_{2.Ley} = \frac{32758.0853\ kW}{285.86\ \frac{Kg}{s} * \left[\left(1265\ \frac{KJ}{Kg} - 146.7\ \frac{KJ}{Kg} \right) - (35 + 273.15) * \left(3.28\ \frac{KJ}{Kg * ^\circ K} - 0.5051\ \frac{KJ}{Kg * ^\circ K} \right) \right]} = 0.4353$$

9.2. Potencia mecánica de la bomba de vacío de anillo líquido.

Procedimiento que ejecuta el programa Python para calcular la potencia mecánica de la bomba:

a) Declarar en el programa Python los parámetros de entrada:

Flujo Principal de vapor:	$\dot{m}_{vp} = 68.33\ \frac{kg}{s}$
Porcentaje de gases no condensables:	$m_g = 1\% = 0.01$
Eficiencia Isoentrópica de la bomba:	$\eta_{isentropica} = 0.65$
Presión en la entrada de la bomba:	$P_8 = 30.28\ KPa$
Presión a la salida de la bomba:	$P_{11} = 107.35\ KPa$
Gas predominante:	CO_2
Diferencial de temperatura:	$dT = 5.45^\circ C$

b) Determina la temperatura de saturación del agua a la presión de entrada de la bomba P_8 y calidad igual a cero (0).

$$T_{sat} = 69.31^\circ C$$

c) Encuentra la temperatura en el punto de extracción (a la entrada de la bomba).

$$T_8 = T_{sat} - dT = 69.31 - 5.45 = 63.86^\circ C$$

d) Con la temperatura (T_8), la presión (P_8) y una calidad igual a 1, determina la fracción de masa de agua que se tiene a la entrada de la bomba.

$$x_8 = 0.070$$

- e) Con la presión de entrada (P_8), calidad igual 1 y fracción de masa de agua (x_8), determina la entalpía y entropía a la entrada de la bomba:

$$h_8 = 656.06 \text{ KJ/Kg} \quad s_8 = 3.3669 \text{ KJ/(Kg * K)} \quad T_8 = 29.81 \text{ °C}$$

- f) Con la presión de salida (P_{11}), entropía de entrada (s_8) y fracción de masa de agua x_8 , se determinan las propiedades del punto de compresión isentrópico a la salida de la bomba. La entropía de entrada se asume igual a la de salida ($s_{11} = s_8$).

$$h_{11 \text{ isentropica}} = 748.15 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_{11 \text{ isentropica}} = 127.48 \text{ °C}$$

- g) Luego, calcula la entalpía real del punto de compresión a la salida de la bomba:

$$h_{11} = h_8 + [(h_{11 \text{ isentropica}} - h_8)/\eta_{\text{isentropica}}]$$

$$h_{11} = 656.06 + [(748.15 - 656.06)/0.65] = 797.74 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- h) Fracción de gases NC que pasa por la bomba:

$$m = \frac{m_g}{1 - x_8} = \frac{0.01}{1 - 0.070} = 0.01075$$

- i) Flujo de vapor que es arrastrado por los gases NC hacia la bomba.

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{vp}(m - m_g) = 68.33 * (0.01075 - 0.01) = 0.05125 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

- j) Flujo de gases NC que pasa por la bomba:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{vp} * m = 68.33 * 0.01075 = 0.7345 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

- k) Flujo total hacia la bomba.

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_g + \dot{m}_v = (0.7345 + 0.05125) \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0.78575 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

- l) Potencia mecánica de la bomba de vacío de anillo líquido:

$$\dot{W}_{\text{bomba}} = \dot{m}_8 * (h_{11} - h_8)$$

$$\dot{W}_{\text{bomba}} = 0.78575 * (797.74 - 656.06) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 111.326 \text{ kw}$$

9.3. Selección de la potencia del motor.

La potencia del motor se escoge de acuerdo a la curva de desempeño de la bomba, de la siguiente manera:

- m) Con el flujo total hacia la bomba y la presión de vacío que se requiere, intersectar en la curva de rendimiento las rpm del motor eléctrico más adecuado, ver gráfico 2.
n) Luego, con las rpm del motor intersectar nuevamente en la curva la potencia del motor, ver gráfico 2.

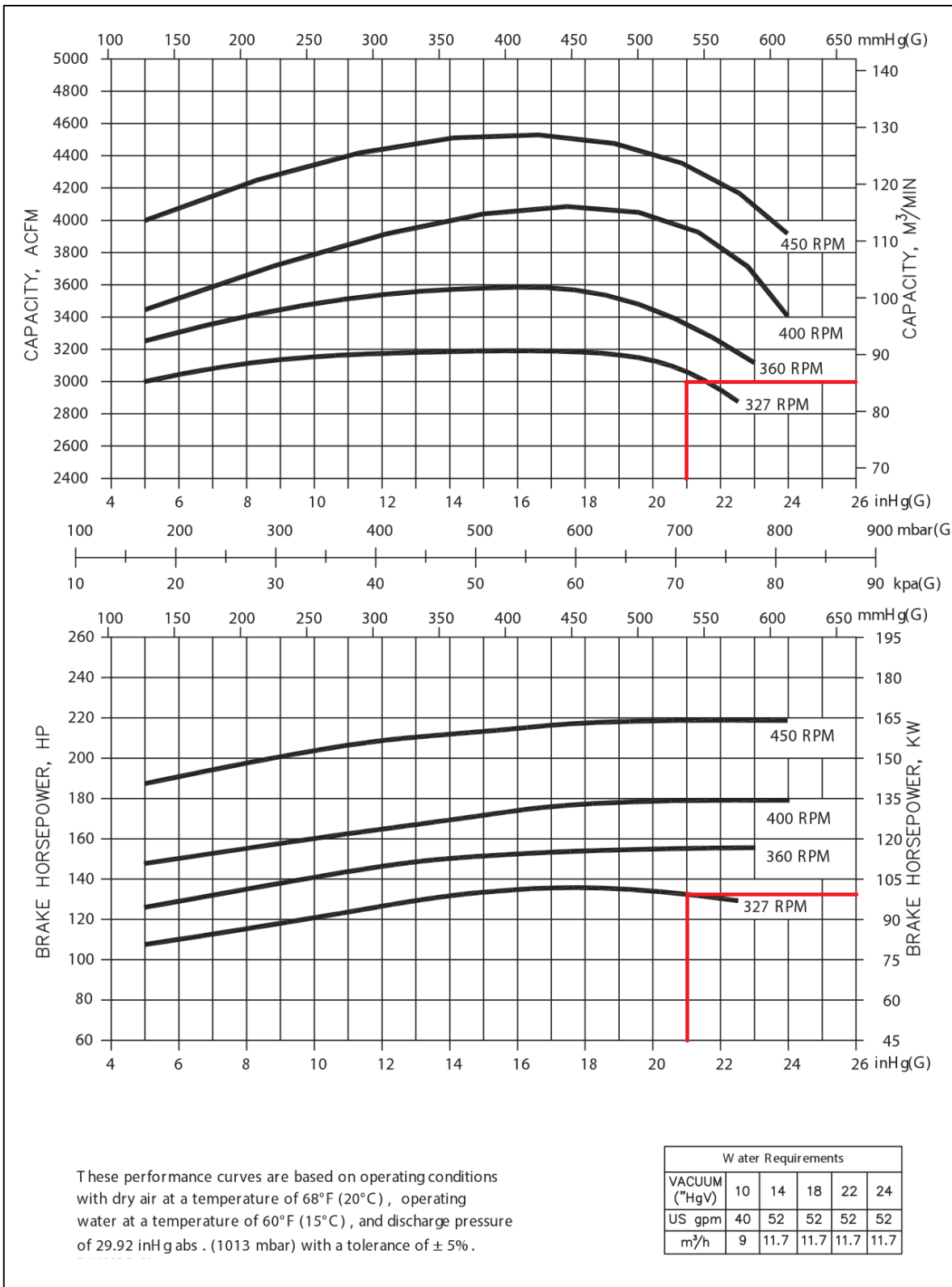


Gráfico 2. Curva de desempeño de una bomba de vacío.¹

¹ Fuente: Dekker Vacuum Technologies Inc, catalogo comercial bombas de vacío de anillo líquido, series Máxima C.

10. Resultados.

Las siguientes tablas resumen los resultados obtenidos de los cálculos realizados.

Sistema de vacío (condiciones de diseño)	
Sistema de 2 etapas de eyectores	
1ra etapa (consumo de vapor):	1.83 kg/s
2da etapa (consumo de vapor):	2.16 kg/s
Total (consumo de vapor):	3.99 kg/s
Turbina (bajo condición de diseño del sistema de vacío)	
Potencia mecánica de la turbina, MW	31.7177
Flujo de vapor hacia la turbina kg/s	66.16
Consumo específico de la turbina, kg/s/MW	2.35
Potencia bruta, kWe	29.8147
Potencia neta, kWe	27.3147
Eficiencia térmica	8.77%
Eficiencia de la segunda ley	42.15%

Tabla 5. Resultados obtenidos del análisis al sistema de vacío eyector-eyector.

Sistema híbrido	
Sistema híbrido eyector bomba de vacío de anillo líquido.	
1ra etapa (consumo de vapor):	1.83 kg/s
Potencia mecánica de la bomba LRVP (kW):	107.89
Potencia del motor de la bomba LRVP (kW/HP)**:	120 / 160
Flujo a la bomba LRVP	
Flujo de NCG hacia la bomba (kg/s):	0.68
Flujo de vapor hacia la bomba (kg/s):	0.05
Flujo de aire hacia la bomba (kg/s):	0.09
Flujo total hacia la bomba (kg/s)	0.81
Turbina	
Potencia mecánica de la turbina, MW	32.7581
Flujo de vapor hacia la turbina kg/s	68.33
Consumo específico de la turbina, kg/s/MW	2.27
Potencia bruta, kWe	30.7926
Potencia neta, kWe	28.1847
Eficiencia térmica	9.05 %
Eficiencia de la segunda ley	43.53 %
** No es necesario incluir el consumo de la bomba de agua para el sello de la bomba LRVP porque se usaría el mismo flujo que se dedicaba para la segunda etapa de eyectores.	

Tabla 6. Resultados del análisis al sistemas de vacío eyector-bomba de anillo líquido.

11. Evaluación Financiera del proyecto.

La evaluación financiera del proyecto se realizó con el método del valor actual neto, se asumen las siguientes condiciones:

- Tasa de descuento: 10% anual.
- Costo del MWh: U\$ 115 dólares netos.
- Inversión inicial: U\$ 3,297,000.0 dólares netos.
- Costo promedio de mantenimiento anual: U\$ 3,000.0 dólares netos.
- Otros costos: U\$ 2,000.0 dólares netos.

El monto de inversión inicial incluye:

- Compra de todos los equipos principales y auxiliares.
- Honorarios por mano de obra.
- Costos de montaje y puesta en marcha.
- Costos de obras civiles.
- Costos de traslados.

El proyecto será considerado rentable si la inversión se recupera en plazo de 5 años con una tasa de interés del 10 % anual.

A continuación, la fórmula matemática que permite calcular el valor actual neto.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

Donde:

- V_t representa los flujos de caja en cada periodo t.
- I_0 es el valor del desembolso inicial de la inversión.
- n es el número de periodos considerado.
- k es el interés o tasa interna de retorno.

Tabla 7. Condiciones iniciales del proyecto.

ITEM	Datos iniciales	
5	Incremento neto estimado	0.87 MW
6	Energía estimada por día	20.88 MWh
7	Precio por MWh	U\$ 115.00
8	Costo promedio de mantenimiento anual	U\$ 3000.00
9	Tasa de interés	10%

Tabla 8. Costos asociados al proyecto.

Descripción	cantidad	Costo del equipo	Inversión inicial	Mantenimiento anual	Otros costos	TOTAL
Bomba de vacío LRVP	1	U\$ 1,297,000.00	U\$ 2,000,000.00	U\$ 3,000.00	U\$ 2,000.00	U\$ 3,302,000.00

Tabla 9. Ingresos estimados en el periodo remanente de concesión.

Ingresos Estimados			
Fecha	Precio MWh	Ingresos por día	Ingresos por año
2017	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2018	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2019	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2020	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2021	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2022	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2023	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2024	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2025	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2026	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2027	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2028	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2029	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2030	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2031	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2032	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00
2033	U\$ 115.00	U\$ 2401.20	U\$ 876438.00

Tabla 10. Cálculo del valor presente neto.

Año	Período	Ingresos estimados	Beneficio neto actualizado	Valor actual neto
	n	V_t	$\frac{V_t}{(1+k)^t}$	$\sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$
2017	0	-3302000.00	-	-\$3302,000.00
2018	1	873,438.00	794,034.55	-\$2507,965.45
2019	2	873,438.00	721,849.59	-\$1786,115.87
2020	3	873,438.00	656,226.90	-\$1129,888.97
2021	4	873,438.00	596,569.91	-\$533,319.06
2022	5	873,438.00	542,336.28	\$9,017.21
2023	6	873,438.00	493,032.98	\$502,050.19
2024	7	873,438.00	448,211.80	\$950,262.00
2025	8	873,438.00	407,465.27	\$1357,727.27
2026	9	873,438.00	370,422.98	\$1728,150.24
2027	10	873,438.00	336,748.16	\$2064,898.40
2028	11	873,438.00	306,134.69	\$2371,033.09
2029	12	873,438.00	278,304.26	\$2649,337.36
2030	13	873,438.00	253,003.88	\$2902,341.23
2031	14	873,438.00	230,003.52	\$3132,344.76
2032	15	873,438.00	209,094.11	\$3341,438.87
2033	16	873,438.00	190,085.56	\$3531,524.43
Beneficio neto acumulado				U\$ 24540125.07

12. Conclusiones.

Si se considera la potencia neta que entrega la planta a la red de transmisión para cada uno de los diferentes sistemas de vacío analizados, se puede notar que con el arreglo bomba de anillo líquido el conjunto turbogenerador entrega 870 kWe más que el arreglo eyector-eyector, lo cual significa un incremento del 3.18% en la generación actual. En cuanto a la eficiencia de utilización (eficiencia de segunda ley), se estima una mejora del 1.38%.

Se concluye que el proyecto es factible económicamente, se estima que la inversión es recuperable en el quinto año a una tasa de interés nivelada del 10% anual. En el sexto año se estima un incremento de U\$ \$502,050.19 dólares en los ingresos de caja por venta de energía. Considerando que aún quedan 17 años de concesión, se estima un beneficio acumulado de U\$ 24540125.07 dólares al final de la concesión.

13. Recomendaciones.

Tomando como base los eventos de disparo ocurridos en el último año, recomendamos realizar un estudio que evalúe el desempeño del condensador y la torre de enfriamiento, con el fin de encontrar y corregir la causa raíz que está ocasionando la falla. Cambiar el sistema de vacío actual por un sistema híbrido eyector bomba de anillo líquido no reduce el riesgo de disparo si la falla que colapsa el sistema proviene de una fuente externa al sistema de remoción de gases no.

No obstante, considerando que los gases no condensables en los últimos años han mostrado una tendencia a disminuir, es recomendable realizar el cambio del sistema debido a que los eyectores no ofrecen la posibilidad de trabajar a cargas reducidas lo que supone un gasto innecesario de vapor por el hecho de estar trabajando continuamente al 100% de su capacidad. Por el contrario, las bombas de anillo líquido que generalmente son gobernadas por un variador de frecuencia se adaptan muy bien a las variaciones de carga lo cual agrega muy buena confiabilidad y estabilidad al sistema.

14. Agradecimientos.

Y todo lo que hagan, de palabra o de obra, háganlo en el nombre del Señor Jesús, dando gracias a Dios el Padre por medio de Él. Colosenses 3:17.

Primero a Dios por ser lumbreira en nuestro camino, su amor perdura para siempre.

A nuestras familias por su calidez, comprensión y el apoyo que nos han brindado en todo momento, sin ellos jamás hubiésemos podido alcanzar nuestras metas.

Al Ing. Oscar Cideos por su asesoría en la realización de este proyecto.

Al Ing. Jose Luis Enríquez por su atención y sus valiosos consejos.

A los ingenieros Juan Escalante y Jaime Parra, gracias por creer en mí y por todo el apoyo que me han brindado.

A nuestros compañeros del diplomado que con su compañía y amistad hicieron muy agradable esta experiencia.

Al honorable jurado, Ing. Oscar Cideos Núñez, Ing. Álvaro Flamenco e Ing. Francisco Alfredo De León Torres, por dedicarnos parte de su tiempo para la culminación de este trabajo.

A la GEO, a la Universidad, a UNU-GTP, a Polaris Energy y a todos aquellos que hicieron posible esta oportunidad, por la educación impartida, por el apoyo hacia mí y mis compañeros.

15. Referencias.

- Henríquez. J, (2016), Presentación de Inducción a sistemas de vacío durante pasantías de Proyecto Final de Graduación Diplomado en Geotermia para América Latina Edición 2016.
- NASH, Brochure: proyectos en planta geotérmicas, instalación de nuevos sistemas de vacío en los campos Yanaizu Nishiyama – Japan y Germencik – Turkey, sin fecha de publicación.
- NASH, Manual de sistemas de vacío, literatura de consulta y apoyo técnico.
- Olivares. A, Zaleta. A, Lara. F, Riesco. J, simulador termodinámico de una planta de vapor geotérmico, memorias del xv congreso internacional anual de la Somim del 23 al 25 de septiembre, 2009 cd. Obregón, Sonora, México.
- Lopez. M, Diseño conceptual de medidor de gases no condensables para Los Azufres, Michoacán, México.
- Registro histórico de las condiciones operativas de la planta en estudio, en el periodo Enero – noviembre 2016: Estadísticas de operación y producción de campo y planta.
- ESMAP, 2012. Manual de Geotermia: Como Planificar y Financiar la Generación de Electricidad.
- Dekker Vacuum Technologies Inc, catalogo comercial en línea de bombas de vacío de anillo líquido, series Máxima C.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID) 2016, Curso básico en exploración geotérmica para la integración regional, Edición 2016: MÓDULO I “Introducción a la Energía Geotérmica”.
- Castillo, J., 2016; Componentes de Plantas Geotérmicas, Diplomado en Geotermia para América Latina, Noviembre 2016.
- Castillo, J. (2016), Tipos y estructura de una planta geotérmica, presentación en módulo VIII: Plantas Geotérmicas y Aplicaciones de Mediana y Baja entalpía, Diplomado en geotermia para América Latina, Edición 2016.
- Castillo, J. (2016), Componentes de plantas geotérmicas, presentación en módulo VIII: Plantas Geotérmicas y Aplicaciones de Mediana y Baja entalpía, Diplomado en geotermia para América Latina, Edición 2016.
- Castillo, J. (2016), Sistemas de acarreo, presentación en módulo VIII: Plantas Geotérmicas y Aplicaciones de Mediana y Baja entalpía, Diplomado en geotermia para América Latina, Edición 2016.
- Magaña, M. (2016), Desgasificación difusa, Presentación en módulo III: Geoquímica Aplicada a la Geotermia, Diplomado para América Latina 2016.
- Magaña, M. (2016), Gases en sistemas hidrotermales, Presentación en módulo III: Geoquímica Aplicada a la Geotermia, Diplomado para América Latina 2016.