



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA

Análisis del acoplamiento de sistemas de generación eléctrica y desalación de agua de mar, vía los flujos geotérmicos de rechazo del sistema PWG y del flujo de alimentación del sistema MED-LE empleando recursos geotérmicos de baja entalpía

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA
M. en I. Héctor Miguel Aviña Jiménez

TUTOR
Dr. Gabriel León de los Santos, Facultad de Ingeniería UNAM

COMITÉ TUTOR
Dr. Martín Salinas Vázquez - Instituto de Ingeniería UNAM
Dr. Agustín Valera Medina – Cardiff University, Wales, UK
Dr. Daniel Saucedo Carvajal - CICESE
Dr. Francisco Solorio Ordaz – Facultad de Ingeniería UNAM

Ciudad Universitaria, México D.F. Agosto 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. MARTIN SALINAS VÁZQUEZ
Secretario: DR. FRANCISCO SOLORIO ORDAZ
Vocal: DR. GABRIEL LEÓN DE LOS SANTOS
1^{er}. Suplente: DR. DANIEL SAUCEDA CARVAJAL
2^{d o}. Suplente: DR. AGUSTÍN VALERA MEDINA

Ciudad de México Junio de 2016

TUTOR DE TESIS:

DR. GABRIEL LEÓN DE LOS SANTOS

FIRMA

HIPÓTESIS

México tiene un gran potencial de generación de energía eléctrica a partir de fuentes alternas, que pueden satisfacer las necesidades energéticas de las tecnologías de desalación de agua de mar.

La desalación es un área de oportunidad relevante y de actualidad para innovar y dar solución a problemáticas presentadas en el acoplamiento convencional de sistemas de generación eléctrica y desalación de agua de mar con energía geotérmica de baja entalpia, como lo es, la dependencia de la red eléctrica y bajo factor de planta por mantenimientos frecuentes de los intercambiadores de calor de tubos y coraza.

Si se propone un sistema de acoplamiento PWG por sus siglas en inglés (Pressure Water Generation) y MED-LE (Multi Effect Distillation Low Enthalpy), con intercambiadores de calor de placas y autoabastecimiento, se podría lograr más seguridad, mayor confiabilidad y 100% de independencia de la red eléctrica, además se podría incrementar entre un 5 a 6% el factor de planta de los sistemas convencionales al disminuir los paros por limpieza, y aumentaría la producción de agua dulce.

En adición, es importante este campo de investigación, porque puede ofrecer mayores y mejores incentivos tecnológicos de desempeño a los sistemas de generación y desalación, que hagan más atractivas las inversiones para lograr su aprovechamiento.

Las condiciones de mejor desempeño de los sistemas acoplados PWG y MED-LE con geotermia de baja entalpia, y los potenciales detectados en varias partes de las costas del territorio nacional, podrían incentivar y acelerar su aprovechamiento en las regiones del norte de México como Ensenada, Los cabos, Puertecitos, La Paz, Sonora, etc., que se caracterizan por carencias de agua potable.

Además, las plantas de desalación podrían estar aisladas de la red eléctrica y ubicarse en lugares que no cuentan con los servicios de electricidad, ayudando a generar beneficios sociales y ambientales vía la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero.

OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

Objetivos generales

- Definir y justificar las ventajas operativas y de diseño del ciclo PWG con el ciclo binario convencional así como del sistema MED-LE con el sistema MED convencional.
- Analizar el sistema de desalación de agua de mar con energía geotérmica de baja entalpia PWG-MED-LE en base al acoplamiento de los flujos geotérmicos de rechazo del sistema PWG y del flujo de alimentación del sistema MED-LE acoplados en una sola unidad, por medio del estudio del sistema y proceso de transferencia de calor entre los flujos geotérmicos de ambos sistemas y la integración del remanente energético que sale y entra de la PWG a la MED-LE.

Objetivos específicos

- Hacer un estudio del estado del arte del aprovechamiento de la geotermia de baja entalpia en México y en el mundo para tener un panorama general de las áreas de oportunidad en este campo de investigación.
- Evaluar técnicamente las medidas necesarias para aumentar el factor de planta de los ciclos binarios geotérmicos y las desaladoras térmicas con tecnología MED.
- Analizar la operación técnica de los sistemas MED-LE y PWG, el diseño de sus componentes y evaluar el sistema de acoplamiento de los flujos geotérmicos de rechazo del sistema PWG y del flujo de alimentación del sistema MED-LE así como evaluar los sistemas de vacío de la que se podrían ocupar en la MED-LE.
- Analizar la factibilidad técnica del acoplamiento de tecnologías PWG y MED-LE como una tecnología en conjunto sustentable.

DESARROLLO

El desarrollo del trabajo consiste en 4 capítulos, los cuales se describen a continuación

En el primer capítulo se realizó una búsqueda científica del estatus de las tecnologías que se ocupan actualmente para el aprovechamiento de energía geotérmica y la desalación con ello dar un panorama general de los usos de la energía geotérmica de baja entalpia y la desalación de agua de mar en México.

En el segundo capítulo se analizaron los sistemas de aprovechamiento geotérmico, indicando sus principales características y la propuesta de acoplamiento de los sistemas de aprovechamiento geotérmico, para determinar las ventajas que se podrían tener sobre los sistemas convencionales, en base a sus análisis energéticos de 1ra ley aplicados a los equipos principales.

También se evaluó la operatividad y desempeño de la planta MED-LE con varias configuraciones de intercambiadores de calor, para aumentar el factor de planta en los sistemas MED LE y en los sistemas acoplados PWG – MED-LE proponiendo el diseño final del acoplamiento.

En el tercer capítulo se propusieron 3 sistemas de acoplamiento realizando el análisis energético de estas propuestas determinando la configuración que dé resultados que puedan permitir una dependencia energética, periodos de mantenimiento adecuados y una producción de agua dulce aceptable.

En el cuarto capítulo se encuentran las conclusiones del trabajo y el análisis del trabajo futuro y su posible potencial de instalación en las zonas con potencial geotérmico en México.

Tabla de contenido

HIPÓTESIS.....	I
OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS.....	II
Objetivos generales.....	II
Objetivos específicos.....	II
DESARROLLO.....	III
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABLAS.....	VIII
I.- Antecedentes geotérmicos y de la desalación.....	10
Introducción.....	10
1.1.- Energía geotérmica.....	10
1.2.- ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA.....	19
1.2.1.- Aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía para usos directos.....	20
1.2.2.- Aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía para generación eléctrica.....	22
1.2.3.- Potencial energético de geotermia de baja entalpía en México, lugares más factibles.....	25
1.3.- DESALACIÓN.....	27
1.3.1.- Tipos de desalación.....	30
1.3.2.- Necesidades energéticas de las desaladoras.....	31
1.4.- DESALACIÓN DE AGUA DE MAR CON ENERGÍAS RENOVABLES.....	32
1.4.1.- Desalación de agua de mar con energía geotérmica.....	33
CONCLUSIONES.....	34
2.- ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS CONVENCIONALES Y DE LA OPCIÓN DE ACOPLAMIENTO PWG Y MED-LE.....	35
INTRODUCCIÓN.....	35
2.1.- ANÁLISIS TÉCNICO Y ENERGÉTICO.....	35
2.1.1.-Ciclo binario.....	35
2.1.3.- Ciclo Binario Modificado “PWG”.....	45
2.1.3.- Sistema MED.....	53
2.1.4.- Sistema MED-LE (Multi Effect Distillation Low Enthalpy).....	64
2.2.- OPERATIVIDAD Y DESEMPEÑO DE LA MED CON EL INTERCAMBIADOR DE PLACAS.....	71
2.2.2.- Balance de masa y energía en cámaras.....	73
2.2.3.- Metodología para resolución.....	76
2.2.4.- Resultados.....	77
2.3. COMPARATIVA DE LOS SISTEMAS PROPUESTOS MED, MED-LE Y MED PLACAS.....	79
2.4.- CONCLUSIONES.....	82
3. ANÁLISIS DE LA OPERATIVIDAD Y DESEMPEÑO DE LA PLANTA PWG ACOPLADA A UN SISTEMA MED-LE CON INTERCAMBIADOR DE PLACAS.....	83

3.1.- ANÁLISIS DE LAS PROPUESTAS DE ACOPLAMIENTO DEL CICLO PWG CON EL SISTEMA MED-LE	83
3.2.- ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL SISTEMA DE ACOPLAMIENTO PWG MED-LE	85
3.3.-COMPARATIVAS Y RESULTADOS SOBRE LA OPERATIVIDAD DEL SISTEMA DE ACOPLAMIENTO PWG- MED-LE CON EL PROGRAMA HYSYS ASPEN	94
3.3.1.- Definición de propuestas.....	94
3.3.2.- Parámetros iniciales de propuestas.....	94
3.3.3.- Ecuación de estado para simulación.....	95
3.3.4.- Simulaciones.....	96
3.3.5.- Resultados	100
3.4.- CONCLUSIONES.....	103
4.- CONCLUSIONES GENERALES.....	104
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	105
NOMENCLATURA	108
ARTICULOS	110
ANEXOS.....	113

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1.- Modelos de la estructura de la tierra (Glassley, 2015)	11
Figura 1.2.- Lodos hirvientes y vapor (Geothermal Education Office, 2016)	11
Figura 1.3.- Placas de la corteza terrestre.....	12
Figura 1.4.- Gradiente de Temperatura de la tierra (Geothermal Energy Association, 2016)	13
Figura 1.5.- Esquema de un reservorio geotérmico (Dickson M. y Fanello M., 2009).....	14
Figura 1.6.- Esquema representativo de los usos de la energía geotérmica de sistemas hidrotermales (Llopis y Rodrigo, 2010).....	15
Figura 1.7.- Sistema de roca seca caliente.....	15
Figura 1.8.- Sistema de generación propuesto para una ventila hidrotermal (IMPULSA IV, 2009)	16
Figura 1.9.- Nevado de Colima México	16
Figura 1.10.- Representación de un sistema geopresurizado en Texas (Geothermal Energy Association 2016)	17
Figura 1.11.- Resultados del Muestreo geoquímico de manifestaciones hidrotermales (CFE, 2010)	19
Figura 1.12.- Se muestran 20 zonas geotérmicas con su potencial eléctrico (Hiriart 2011)	19
Figura 1.13.- Principales usos de la energía geotérmica en función de la temperatura (Llopis et al 2010).20	
Figura 1.14.- Distribución de la utilización del calor geotérmico en el mundo. (TJ/año), en 2005 (Lund, 2005)	21
Figura 1.15.- Ciclo Binario de generación eléctrica utilizando la energía geotérmica (iiDEA 2014)	23
Figura 1.16.- Lugares donde la empresa “Ormat” ha instalado plantas de ciclo binario (ORMAT 2010) ..24	
Figura 1.17.- Plantas de ciclo binario instaladas en México	25
Figura 1.18.- Recursos geotérmicos en la península de Baja California	26
Figura 1.19.- Capacidad de desalación mundial (IDA 2009).....	27
Figura 1.20.- Capacidad instalada por tamaño de las unidades, calidad del agua empleada, tecnología y empleo del agua tratada.....	29
Figura 1.21.- Sub-Sistemas en un planta desaladora.....	30
Figura 1.22.- Combinación de las energías renovables con los métodos de desalación (Eltawil, 2009)	32
Figura 1.23.- Procesos de desalación y su recurso energético impulsado por energías renovables (Mathioulakis et al, 2007).	33

Capítulo 2

Figura 2.1.- Planta de ciclo binaria instalada en el campo geotérmico de Los Azufres México.....	36
Figura 2.2.- Esquema del ciclo binario	37
Figura 2.3.- Diagrama P-h de un fluido de trabajo típico en el ciclo binario.	38
Figura 2.4.- Turbina y generador del ciclo binario convencional	38
Figura 2.5.- Condensador del ciclo binario convencional.....	39
Figura 2.6.- Bomba de condensado del ciclo binario convencional.....	40
Figura 2.7.- Diagrama Temperatura-Transferencia de calor para el evaporador y el precalentador (DiPippo 2007)	41
Figura 2.8.- Diagrama de flujos para la hoja de cálculo del ciclo binario convencional.	44
Figura 2. 9.- Diagrama del ciclo PWG.....	46
Figura 2. 10.- Intercambiadores de calor.....	47
Figura 2. 11.- Acercamiento de temperaturas dentro de (A) Intercambiador de placas, y (B) Intercambiador de carcasa y tubos	47
Figura 2. 12.- Diagrama temperatura vs entropía del ciclo PWG	48
Figura 2. 13.- Ilustración del proceso en una placa orificio	49
Figura 2. 14.- Separador de flujos centrifugo.....	49
Figura 2.15.- Comparación entre el CBC y el CBM (PWG) variando la temperatura de entrada del fluido geotérmico contra la eficiencia del ciclo.....	51

Figura 2.16.- Comparativa del CBC y el CBM (PWG) variando la temperatura ambiente contra la eficiencia del ciclo.....	51
Figura 2.17.- Comparativa del CBC y el CBM (PWG) variando la potencia neta contra el gasto del fluido de trabajo necesario.....	52
Figura 2.18.- Comparativa del CBC y el CBM (PWG) variando la potencia neta contra el gasto de fluido geotérmico necesario.....	52
Figura 2.19.- Proceso de desalación MED.....	54
Figura 2.20.- Planta desaladora tipo MED Tuxpan Veracruz.....	56
Figura 2. 21 Esquema del sistema MED.....	57
Figura 2. 22.- Esquema desaladora tipo MED CFE. Fuente: (CFE 2010) Termoeléctrica Adolfo López Mateos Tuxpan Veracruz México.....	63
Figura 2. 23 Configuración sistema MED LE para aprovechamiento de los recursos geotérmicos de baja entalpía en procesos de desalación.....	66
Figura 2. 24.- Balance de masa y energía de la primera cámara de la MED-LE.....	67
Figura 2. 25.- Balance de masa y energía de la segunda y tercera cámara de la MED-LE.....	67
Figura 2. 26.- Balance de masa y energía del condensador de la MED-LE.....	68
Figura 2. 27.- Diagramas de temperaturas para procesos de transferencia de calor.....	69
Figura 2. 28.- Concentración de sólidos en ppm en la tercera cámara de la MED-LE.....	70
Figura 2. 29.- Representación gráfica de la planta desaladora tipo MED de placas.....	73
Figura 2. 30.- Balance de masa y energía de la primera cámara en una MED de placas.....	74
Figura 2. 31.- Balance de masa y energía de la segunda cámara en una MED de placas.....	74
Figura 2. 32.- Balance de masa y energía de la tercera cámara en una MED de placas.....	75
Figura 2. 33.- Balance de masa y energía del condensador en una MED de placas.....	76
Figura 2. 34.- Parámetros principales obtenidos de la MED de placas.....	78
Figura 2. 35.- Comparativa del rendimiento del porcentaje de destilado vs la temperatura del recurso geotérmico.....	80
Figura 2. 36.- Comparativa del destilado por día vs la temperatura de entrada del recurso geotérmico.....	81
Figura 2. 37.- Comparativa del rendimiento energético vs la temperatura de entrada del recurso geotérmico.....	81

Capítulo 3

Figura 3.1. Acoplamiento PWG MED-LE, Propuesta 1: utilización del recurso geotérmico de la salida de la PWG como fuente energética del sistema MED-LE.....	83
Figura 3.2.- Acoplamiento PWG MED-LE Propuesta 2.- utilizando el recurso geotérmico de la salida del ciclo PWG con un intercambiador de placas.....	84
Figura 3.3.-Propuesta de acoplamiento del ciclo PWG con el sistema MED-LE propuesta 3.- utilizando el fluido de trabajo del ciclo PWG para darle la energía térmica al sistema MED-LE.....	85
Figura 3.4.- Diagramas de flujo del ciclo PWG antes del acoplamiento.....	88
Figura 3. 5.- Diagramas de flujo de los sistemas MED-LE antes del acoplamiento.....	88
Figura 3. 6.- Concentración máxima de sólidos en la propuesta I.....	90
Figura 3. 7.- Destilado por día (producto) de la propuesta I.....	91
Figura 3. 8.- Generación eléctrica en la propuesta II.....	91
Figura 3. 9.- Gasto de masa operacional y de destilado de la propuesta II.....	92
Figura 3. 10.- Eficiencias de la propuesta II.....	92
Figura 3. 11.- Generación eléctrica en la propuesta III.....	93
Figura 3. 12 Gasto de masa operacional y de destilado de la propuesta III.....	93
Figura 3. 13.-Eficiencias de la propuesta III.....	94
Figura 3. 14.- Diagrama del ciclo PWG en el HYSYS Aspen.....	96
Figura 3. 15.-Diagrama de flujo de la propuesta I en HYSYS Aspen.....	97
Figura 3. 16.-Diagrama de flujo de la propuesta II en HYSYS Aspen.....	98
Figura 3. 17.- Diagrama de flujo de la propuesta III en HYSYS Aspen.....	99

Figura 3. 18.- Grafica comparativa entre las propuestas del autoconsumo de las bombas para el ciclo PWG	101
Figura 3. 19.- Grafica comparativa entre las propuestas del destilado del producto obtenido en el sistema MED-LE.....	102
Figura 3. 20.- Grafica comparativa entre las propuestas del porcentaje de recuperación del sistema MED-LE.....	102
Figura 3. 21.-Grafica comparativa entre las propuestas del rendimiento térmico.....	102
Figura 3. 22.- Grafica comparativa entre las propuestas de la potencia de las bombas.	103

LISTA DE TABLAS

Capítulo 1

Tabla1.1.- Clasificación de recursos geotérmicos [°C].....	20
Tabla1.2.- Principales países que hacen utilización directa de la energía geotérmica (Llopis 2010)	21
Tabla1.3.- Comparativa de las tecnologías	28
Tabla1.4.- Comparativa de las necesidades energéticas de los principales procesos de desalación (Miller, 2003).	31
Tabla1.5.- Energía y costos de inversión para producción de energía eléctrica mediante fuentes renovables (Dickson et al, 2009).....	33

Capítulo 2

Tabla 2.1.- Capacidad geotérmica instalada por tecnología de generación (Bertani 2006)	37
Tabla 2.2.- Propiedades termodinámicas de algunos fluidos de trabajo para plantas de ciclo binario (DiPippo, 2007).....	43
Tabla 2.3.- Propiedades medioambientales, seguridad y salud de algunos fluidos de trabajo para plantas de ciclo binario (DiPippo, 2007).....	43
Tabla 2.4.- Datos de entrada para la validación de hoja de cálculo	44
Tabla 2. 5.- Comparación entre la hoja de cálculo y los datos reportados por DiPippo (2008).....	45
Tabla 2.6.- Datos de entrada para realizar la comparativa de rendimiento energético.....	50
Tabla 2.7.- Comparación teórica energética entre CBC y el CBM (PWG) para 1200 [kWe]	50
Tabla 2. 8.- Comparación y validación de resultados del sistema MED.....	64
Tabla 2. 9 Parámetros de sistemas MED con geotermia de baja entalpía.....	64
Tabla 2. 10 Características operativas MED y MED-LE.....	65
Tabla 2. 11.- Datos de entrada para la hoja de cálculo del sistema MED-LE.....	69
Tabla 2.12.- Datos para las cámaras del sistema MED-LE.....	70
Tabla 2. 13.- Resultados obtenidos con la hoja de cálculo del sistema MED-LE.....	70
Tabla 2. 14.- Datos de entrada para el cálculo de la MED de placas	77
Tabla 2. 15.- Datos establecidos para el cálculo de la MED de placas	77
Tabla 2.16.- Resultados principales del cálculo de la MED de placas.....	78
Tabla 2. 17.- Datos de entrada de los sistemas de desalación para su comparativa	79
Tabla 2. 18.- Datos termodinámicos de entrada de los sistemas de desalación	79
Tabla 2. 19.- Tabla de resultados comparativos entre los sistemas de desalación.	80

Capítulo 3

Tabla 3. 1.- Datos de los equipos para el ciclo PWG de 10 KW.....	86
Tabla 3. 2.- Resultados del Ciclo PWG que se ocupó como base para el análisis energético de las propuestas de acoplamiento con el sistema MED-LE.....	86
Tabla 3. 3 Datos Operativos propuestos para las cámaras del sistema MED-LE	87
Tabla 3. 4 Parámetros importantes de la PWG y la MED-LE antes del acoplamiento	87

Tabla 3. 5.- Resultados del análisis energético de las propuestas de acoplamiento	89
Tabla 3.6 Condiciones atmosféricas.....	95
Tabla 3.7 Datos de los Equipos PWG	95
Tabla 3.8.-Datos de los Equipos MED-LE.....	95
Tabla 3. 9.- Resultados relevantes obtenidos del ciclo PWG.....	100
Tabla 3. 10.- Resultados relevantes obtenidos de la desaladora MED-LE	100

I.- Antecedentes geotérmicos y de la desalación

Introducción

En este capítulo se hace un estudio del estado del arte del aprovechamiento de la energía geotérmica y la desalación de agua de mar en México y en el mundo, obteniendo un panorama general de las áreas de oportunidad en este campo de investigación al realizar una revisión de las tecnologías que se ocupan actualmente para el aprovechamiento de energía geotérmica, esto servirá para dar un panorama general de los usos de la energía geotérmica de baja entalpía y la desalación de agua de mar en México.

1.1.- Energía geotérmica

Definición de Geotermia

En general, la palabra geotermia se refiere a la energía térmica natural existente en el interior de la Tierra. En la práctica se le denomina así al estudio y utilización de la energía térmica que transportada a través de la roca y/o fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma, dando origen a los sistemas geotérmicos. Aun cuando la geotermia ha existido siempre, no fue sino hasta principios del siglo pasado que empezó a aprovecharse en forma comercial, haciendo notoria su existencia hace apenas cuatro décadas. En los años 70's con el incremento en el costo de los combustibles fósiles se le dio una importancia relevante, ayudando a suministrar parte de los requerimientos de energía de muchos países.

Estructura de la tierra

Para representar la estructura interna de la Tierra existen dos modelos: el modelo geoquímico y el modelo dinámico. Estos clasifican a la estructura de la Tierra desde la superficie hasta su centro, el cual se encuentra a una profundidad de 6,371 km, en función de su composición química y de la rigidez y plasticidad, respectivamente. En el modelo geoquímico existen tres capas concéntricas: Corteza, manto y núcleo. La capa externa de la superficie, denominada corteza, está constituida por rocas en estado sólido. Su espesor rara vez supera los 70 km, la densidad media es de aproximadamente 3 g/cm³ y la temperatura media en su límite inferior es de unos 400°C. La segunda capa, denominada manto, se halla inmediatamente debajo de la anterior. Se compone de manto superior (700 km de profundidad, 1,500°C de temperatura y 3.3 g/cm³ de densidad) y de manto inferior (2,900 km de profundidad, 3,000°C de temperatura y 5.7 g/cm³ de densidad). Los materiales que constituyen el manto tienen una composición mineralógica distinta de las de las rocas de la parte superficial. A partir de los 2,900 km se inicia la tercera capa denominada núcleo. Se compone de núcleo externo (5,100 km de profundidad, 4,000°C de temperatura y 9 g/cm³ de densidad) y de núcleo interno (hasta 6,371 km de profundidad, 6,000°C de temperatura y 12 g/cm³ de densidad) En el modelo dinámico la estructura se compone de cuatro capas: Litosfera (abarca los 100 km iniciales del manto superior), constituye una parte sólida y rígida; Astenosfera (250 km de profundidad en el manto superior), fundamentalmente es una capa sólida, aunque también contiene parte plástica; Mesosfera (abarca parte del manto superior y todo el manto inferior), constituye una capa sólida; y Endosfera (abarca todo el núcleo), tiene parte fluida, correspondiente al núcleo externo, y parte sólida, correspondiente al núcleo interno (Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2010).

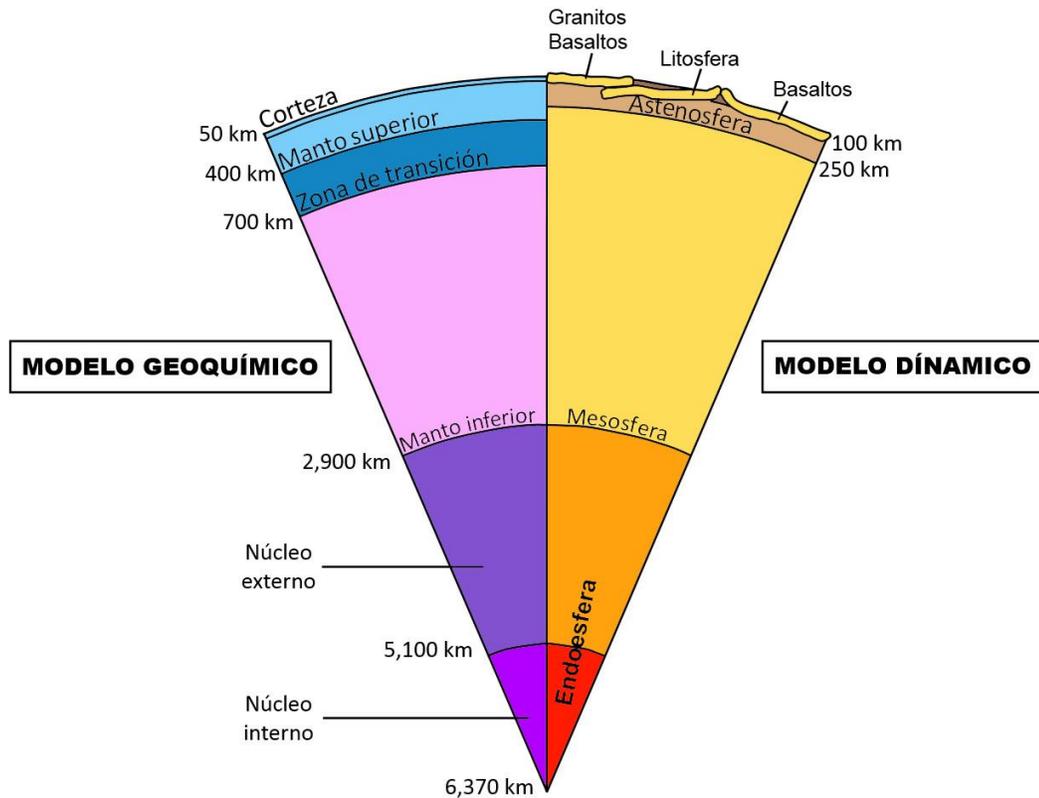


Figura 1.1.- Modelos de la estructura de la tierra (Glassley, 2015)

La corteza está compuesta por placas que se mantienen rígidas y cuando se desplazan ocasionan grandes divisiones en la tectónica terrestre, las manifestaciones geotérmicas aparecen regularmente cerca de estos bordes.

Son seis las placas o áreas litosféricas en las que está dividida la corteza terrestre, además de varias otras placas más pequeñas. Debido a las grandes tensiones generadas bajo la litosfera, estas placas están cambiando continuamente de posición. Los márgenes de las placas corresponden a zonas de la corteza débiles y densamente fracturadas, caracterizadas por una intensa sismicidad, por un gran número de volcanes y por un alto flujo de calor terrestre, debido al ascenso de materiales muy calientes hacia la superficie. Las áreas geotermales más importantes se ubican alrededor de los márgenes de placas. Las principales manifestaciones geotérmicas son los volcanes, los geiseros, las aguas termales y los volcanes de lodo.



Figura 1.2.- Lodos hirvientes y vapor (Geothermal Education Office, 2016)

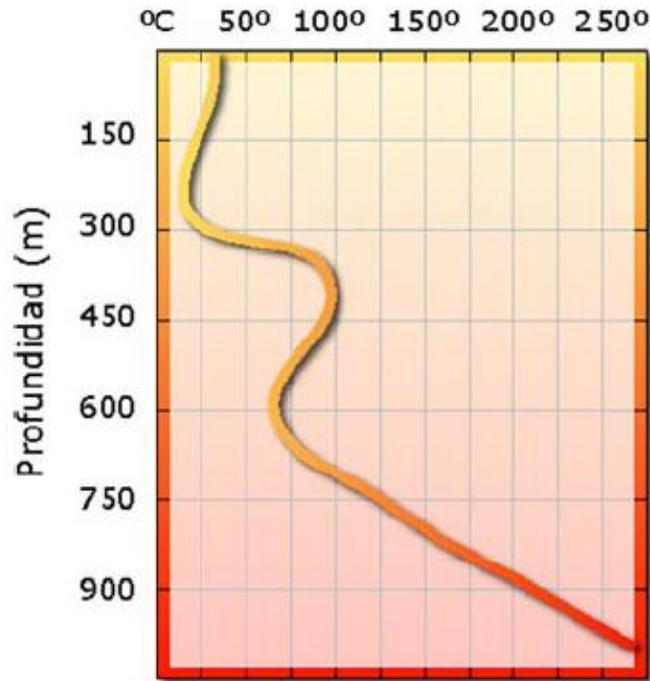


Figura 1.4.- Gradiente de Temperatura de la tierra (Geothermal Energy Association, 2016)

Recursos geotérmicos

Los recursos geotérmicos, el agua caliente y/o roca caliente de los cuales es posible extraer energía se forman por la acumulación del calor en zonas llamadas sistemas geotérmicos a pocos kilómetros de profundidad en la corteza. Se pueden clasificar de varias formas, dependiendo de su tipo o temperatura. Los sistemas de acuerdo con su tipo se pueden clasificar en:

- a) Sistemas hidrotermales
- b) Sistemas de roca seca caliente
- c) Sistemas marinos
- d) Sistemas magmáticos
- e) Sistemas geopresurizados

A continuación se da más detalle de los sistemas geotérmicos:

- a) Sistemas hidrotermales

Son conocidos como reservorios geotérmicos o yacimientos geotérmicos y son sistemas de agua muy caliente y/o vapor. Si las condiciones geológicas de la zona lo permiten se forma una intrusión de magma en la corteza terrestre que calienta las rocas aledañas; si agua subterránea pasa por estas rocas calientes se forma un acuífero de agua caliente o vapor a alta presión. Este reservorio se puede aprovechar perforando hasta llegar a él, se atraviesa la capa sello de rocas impermeables hasta llegar a las rocas permeables que forman el yacimiento, el agua entonces dependiendo de la temperatura y profundidad, saldrá a la superficie en forma de vapor, mezcla o agua caliente.

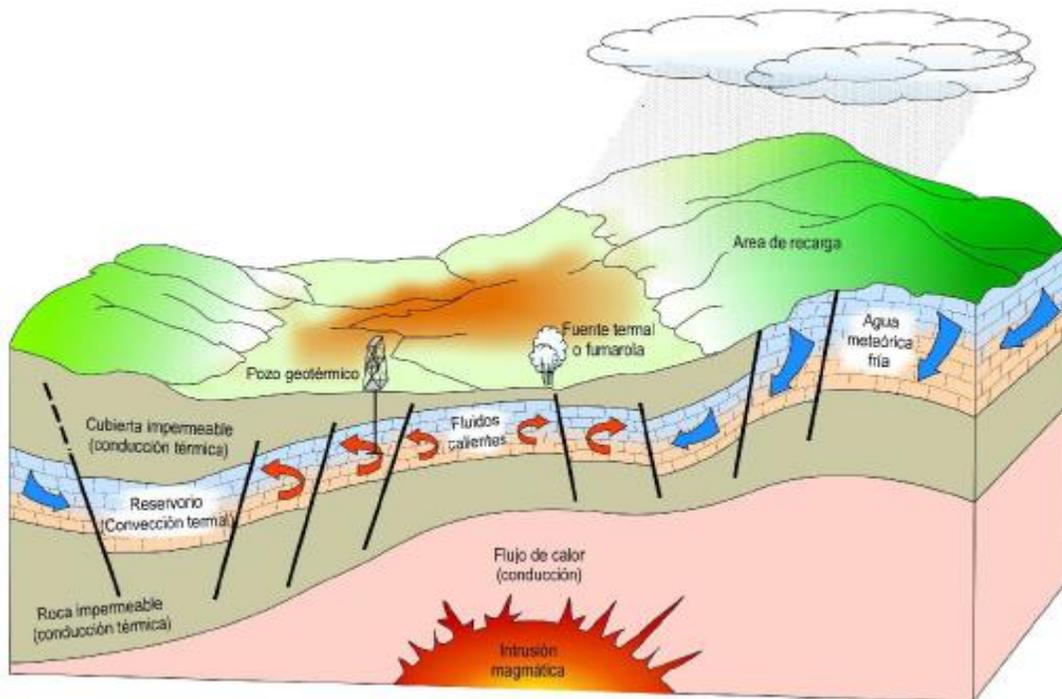


Figura 1.5.- Esquema de un reservorio geotérmico (Dickson M. y Fanello M., 2009)

A su vez estos se clasifican según su temperatura en:

- Recursos de alta temperatura $T > 180\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Recursos de media temperatura $140\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 180\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Recursos de baja temperatura $T < 140\text{ }^{\circ}\text{C}$

Y dependiendo de la temperatura del agua caliente o vapor será la aplicación. La industria en general puede beneficiarse de una fuente de calor económica, segura y limpia (ver figura 1.6).

En la sección 1.2, se dará más detalle de la clasificación por temperatura tomada como base para la clasificación por entalpía.



Figura 1.6.- Esquema representativo de los usos de la energía geotérmica de sistemas hidrotermales (Llopis y Rodrigo, 2010)

b) Roca seca caliente (hot dry rock)

Para aprovechar un recurso de alta o media temperatura, se requiere agua que circule a través de las rocas calientes y forme el reservorio o yacimiento geotérmico que después se explotara. En ausencia de esta agua, un método utilizado para aprovechar este recurso es inyectar agua a alta presión hasta fracturar la roca y formar artificialmente el reservorio.

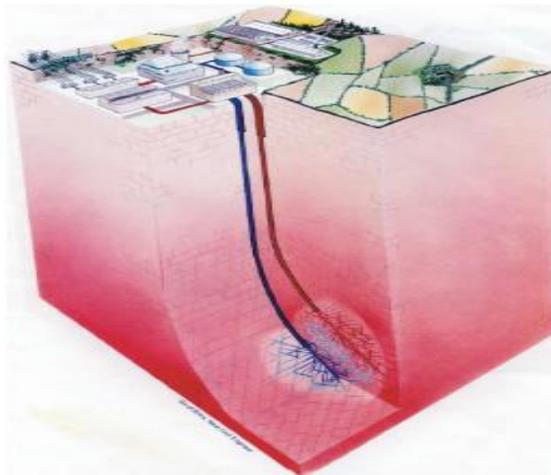


Figura 1.7.- Sistema de roca seca caliente

c) Sistemas marinos.

En el fondo del océano se han encontrado fuentes de agua muy caliente, en el Golfo de California, se han identificado varios puntos de ventilas hidrotermales, se han hecho varias propuestas para el aprovechamiento de estos recursos como el generador submarino propuesto por el Proyecto IMPULSA IV 2008.

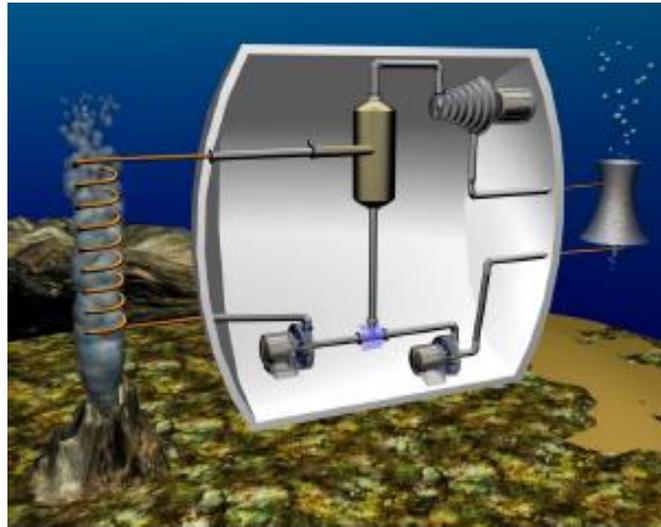


Figura 1.8.- Sistema de generación propuesto para una ventila hidrotermal (IMPULSA IV, 2009)

d) Sistemas magmáticos.

Son sistemas de roca fundida existentes en las cámaras magnaticos de los volcanes. El atractivo más importante son las altas temperaturas disponibles ($T > 800\text{ }^{\circ}\text{C}$). Pero no se cuentan con materiales disponibles en la actualidad.



Figura 1.9.- Nevado de Colima México

e) Sistemas geopresurizados.

Los sistemas geopresurizados son depósitos de agua y vapor, junto con gas metano, almacenados a altas presiones, mayores a la presión hidrostática (700 atm).



Figura 1.10.- Representación de un sistema geopresurizado en Texas (Geothermal Energy Association 2016)

Evaluación del recurso

El aprovechamiento de los recursos requiere de todo un proceso de evaluación y exploración de los mismos y es una actividad multidisciplinaria que reúne geólogos, geofísicos e ingenieros. La exploración es una etapa crucial del proyecto con un gran porcentaje de inversión.

Entre los objetivos de la exploración se incluyen modelos conceptuales del yacimiento, para esto se requieren datos geológicos y geofísicos de la zona, la perforación de pozos de gradiente para estimar las temperaturas en el yacimiento este modelo permitirá estimar el tamaño del yacimiento y su energía, y así tener una mejor certidumbre al momento de iniciar los pozos exploratorios que son anteriores a los pozos de producción.

Recursos geotérmicos de México

México ocupa el cuarto lugar en capacidad geotermoeléctrica con 958 MW a nivel mundial. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) opera actualmente cuatro campos geotérmicos: Cerro Prieto, en Baja California, con 720 MW; Los Azufres, en Michoacán, con 188 MW; Los Humeros, en Puebla, con 35 MW; y Las Tres Vírgenes, en Baja California Sur, con 10 MW. La capacidad geotermoeléctrica de México representa el 2.5% de los más de 38,000 MW de capacidad instalada en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Las principales características de las centrales geotermoeléctricas instaladas en el país se mencionan a continuación.

Cerro Prieto

Es el segundo campo más grande del mundo, se ubica en la parte norte del país, cerca de Mexicali, BC. Es un campo del tipo sedimentario (con los fluidos geotérmicos contenidos en rocas areniscas), asociado a la prolongación sur de la falla de San Andrés y alojado en una cuenca transtensional, cuyas primeras unidades turbogeneradoras empezaron a operar desde 1973. Hay un promedio de 164 pozos en producción continua, con profundidades promedio de 2,500 metros, que suministran alrededor de 50 millones de toneladas de vapor al año. Durante 2005, generó más de 5,500 GWh de energía.

Los Azufres

Está localizado en la parte central de México, en el estado de Michoacán, a 2,800 metros de altitud. Es un campo de tipo volcánico, ubicado en la Faja Volcánica Mexicana, y cuyos fluidos geotérmicos están contenidos en rocas de tipo andesítico. Cuenta con una unidad a condensación de 50 MW y cuatro de 25 MW, siete unidades a contrapresión de 5 MW y dos unidades de ciclo binario de 1.5 MW. Estas unidades son alimentadas con un promedio de 14.6 toneladas de vapor al año por 37 pozos productores.

Los Humeros

Este campo volcánico se ubica en la parte oriental de la Faja Volcánica Mexicana, en los límites de los estados de Puebla y Veracruz, a unos 2,600 metros de altitud. Aquí también son rocas andesíticas las que alojan a los fluidos geotérmicos. Están instaladas siete unidades turbogeneradoras a contrapresión, con una capacidad total de 35 MW. En 2005 estas unidades generaron 291 GWh, y fueron alimentadas por los 4.4 millones de toneladas de vapor que produjeron sus 18 pozos.

Las Tres Vírgenes

Es un campo volcánico, localizado hacia la mitad de la península de Baja California, asociado a un complejo de tres volcanes cuaternarios y a los movimientos tectónicos que separan a la península del resto del continente. Sus fluidos geotérmicos están alojados en rocas intrusivas. En 2001 se instalaron en este campo dos unidades turbogeneradoras a condensación de 5 MW cada una, que durante 2005 fueron alimentadas con 475,000 toneladas de vapor con las cuales se generaron casi 37 GWh.

El potencial geotérmico de México es todavía mayor: en el campo de Cerritos Colorados, ubicado en la periferia de la ciudad de Guadalajara, Jalisco, la CFE ha perforado varios pozos productores, calculándose un potencial de 75 MW; en el campo geotérmico de Cerro Prieto está programado un proyecto de 100 MW; y en Los Humeros, se planea incrementar la capacidad en 51 MW. Adicionalmente, se conocen otras zonas geotérmicas atractivas, en las que se están llevando a cabo programas de exploración. Entre estas zonas se encuentra Acoculco, en el estado de Puebla; La Soledad, en Jalisco; y la zona del Domo San Pedro, en Nayarit. Otras zonas de interés son las de Maguarichic, en Chihuahua; las de Bahía Concepción, en Baja California Sur; y la del volcán Tacaná, en Chiapas. La proyección futura del país en desarrollo geotérmico es muy prometedora debido a la gran cantidad de fuentes termales que se tienen identificadas, tanto para usos eléctricos, como para usos no eléctricos, (ver figura 1.11) (CFE 2011)

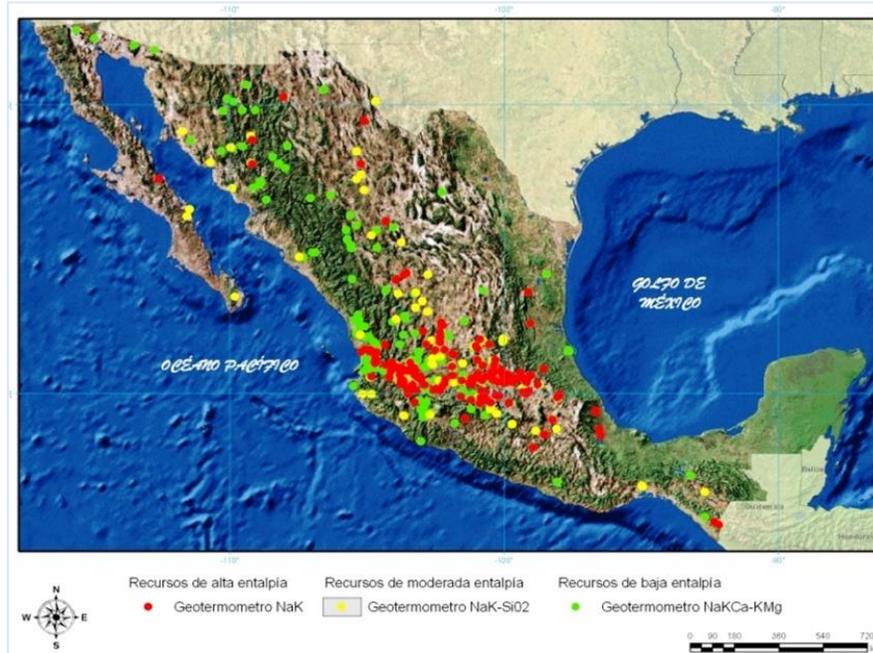


Figura 1.11.- Resultados del Muestreo geoquímico de manifestaciones hidrotermales (CFE, 2010)

En el 2011 la CRE (Comisión Reguladora de Energía) encomendó a una empresa privada con apoyo del BID (Banco Interamericano de Desarrollo) evaluar el potencial geotérmico. El estudio entregó 20 sitios analizando su potencial geotérmico, (ver figura 1.12).

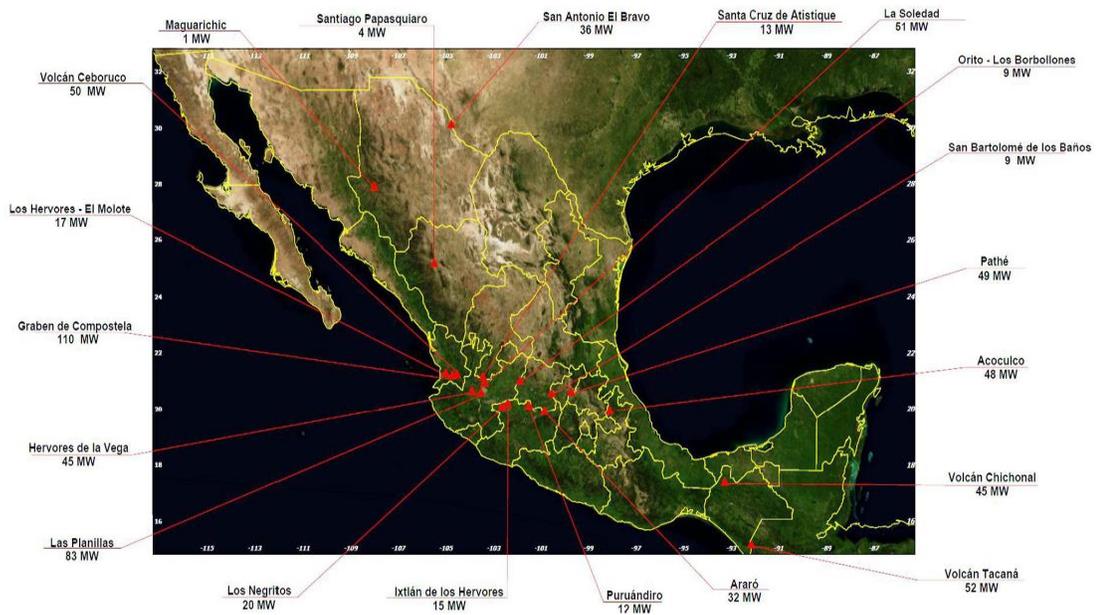


Figura 1.12.- Se muestran 20 zonas geotérmicas con su potencial eléctrico (Hiriart 2011)

Cabe mencionar que estos 20 campos geotérmicos se seleccionaron de las 276 manifestaciones reportadas por CFE por medio del método volumétrico obteniendo el potencial geotérmico posible del yacimiento.

1.2.- ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA.

Existen diferentes denominaciones para clasificar a los campos geotérmicos; dependiendo de si es de roca caliente, o el estado físico del agua, de la cantidad de impurezas que presentan, de la presión de salida de los pozos o de su temperatura del fluido.

La discreción más utilizada comúnmente es la temperatura de los fluidos geotérmicos emanen, como medio de transporte del calor desde el acuífero hasta la superficie, este criterio se conoce como clasificación por entalpías. Por lo tanto los recursos geotérmicos se dividen en yacimientos de baja, media y alta entalpía como podemos observar en la Tabla 1.1.

Tabla1.1.- Clasificación de recursos geotérmicos [°C]

	Meffler and Cataldi (1978)	Hochstein (1990)	Benderitter and Cormy (1990)	Nicholson (1993)	Axelsson abd Gunnlaugsson (2000)
Recursos de baja entalpía	< 90	<125	<100	≤150	≤190
Recursos de entalpía intermedia	90-150	125-225	100-200	-	-
Recursos de alta entalpía	>150	>225	>200	>150	>190

Generalmente, los yacimientos de alta entalpía son utilizados por las plantas generadoras de electricidad debido a su alto potencial, mientras que los de media entalpía pueden utilizarse en diferentes procesos de la industria textil, metalúrgica o agropecuaria y finalmente, la geotermia de baja entalpía es empleada en aplicaciones domésticas, de aire acondicionado o balnearios, en general el uso de recursos geotérmicos de baja entalpía para la generación eléctrica es prácticamente nulo en México tomando en cuenta temperaturas menores a 150°C.

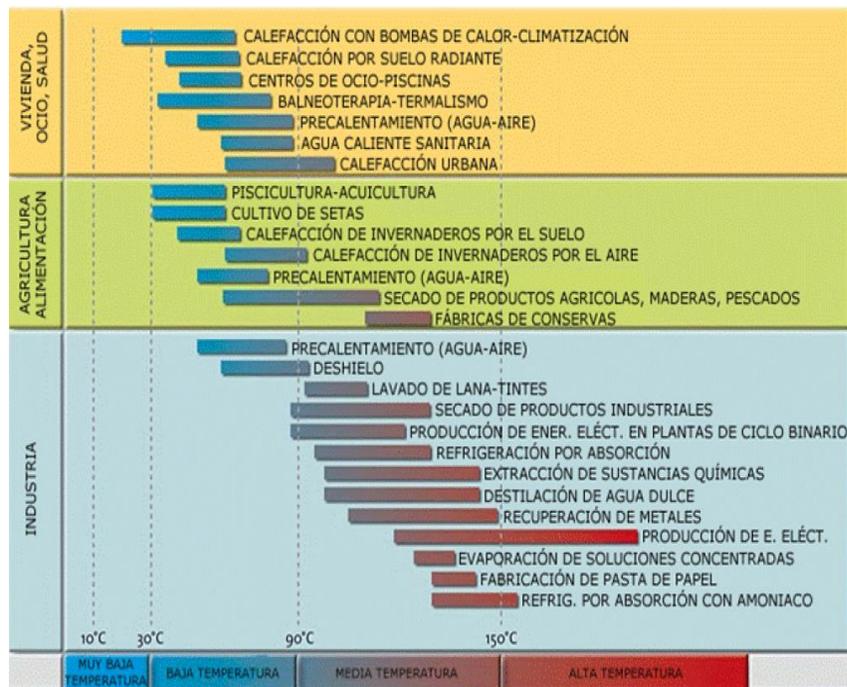


Figura 1.13.- Principales usos de la energía geotérmica en función de la temperatura (Llopis et al 2010)

1.2.1.- Aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía para usos directos.

El uso directo del calor es una de las formas más antiguas, versátiles y comunes de la utilización de la energía geotérmica. Las aplicaciones en baños, calefacción ambiental y distrital, en agricultura, acuicultura y algunos usos industriales constituyen las formas más conocidas de utilización, pero las bombas de calor son las más generalizadas. En menor escala hay muchos otros tipos de utilización, siendo algunos de ellos poco usuales.

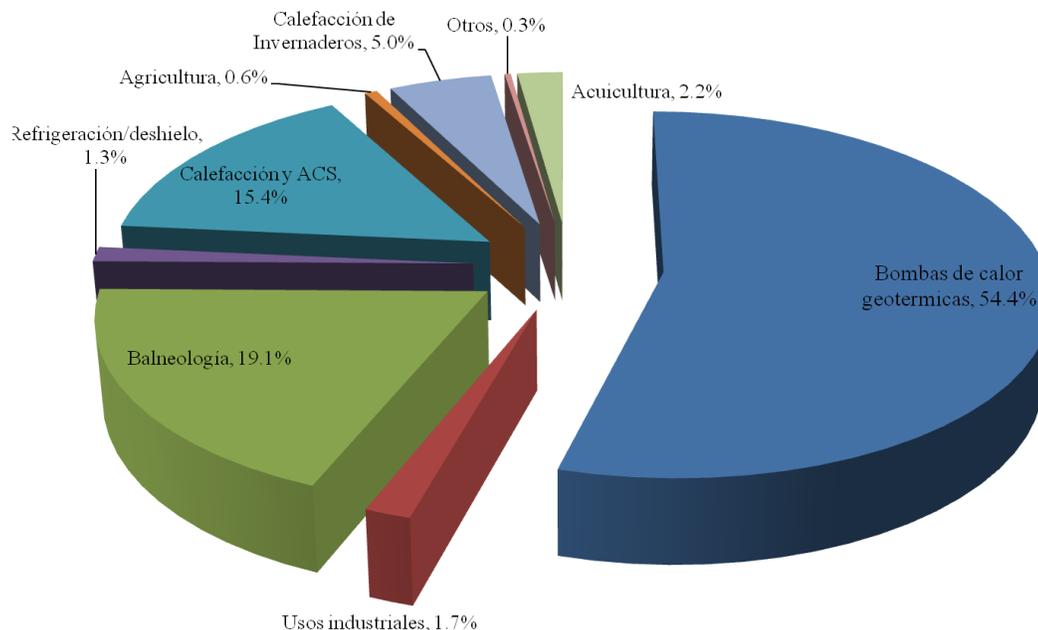


Figura 1.14.- Distribución de la utilización del calor geotérmico en el mundo. (TJ/año), en 2005 (Lund, 2005)

En el año 2005 existían en el mundo 72 países con proyectos de uso de calor geotérmico, en algunos casos como aprovechamiento complementario, o secundario, de la generación de electricidad. Representaban en conjunto, una capacidad instalada de 28,268 MWt, utilizaron 237,372 TJ (75,943 GWh) de energía en forma de calor, ahorrando el equivalente anual de 170 millones de barriles de petróleo (25.4 millones de toneladas), y de 24 millones de toneladas de emisiones de CO₂ a la atmósfera. De ese uso de energía geotérmica en forma de calor, se estima que un 54.4% cerca de 150,000 TJ/año, procedían de bombas de calor geotérmicas (Figura 1.14).

Tradicionalmente, el empleo de calor geotérmico en aplicaciones distintas de la generación de electricidad, se ha venido realizando a pequeña escala, a nivel individual, pero los avances experimentados en años recientes incluyen proyectos colectivos a gran escala, como la calefacción urbana y producción de Agua Caliente Sanitaria en Islandia y Francia, complejos de invernaderos en Hungría y Rusia, y grandes aplicaciones industriales en Nueva Zelanda y Estados Unidos.

Los intercambiadores de calor son actualmente más eficaces, y están mejor adaptados a los proyectos geotérmicos, admitiendo el empleo tanto de bombas de calor geotérmicas que utilizan fluidos altamente salinos. Las bombas de calor geotérmicas que utilizan fluidos a muy baja temperatura han ampliado la utilización de la energía geotérmica a países tradicionalmente no geotérmicos como Francia, Suecia y Suiza, así como en áreas del medio oeste y la parte oriental de Estados Unidos (Tabla 1.2).

Tabla 1.2.- Principales países que hacen utilización directa de la energía geotérmica (Llopis 2010)

País	Utilización		Capacidad	Factor de Capacidad	Uso Principal
	TJ/año	GWh/año	MWt		
China	45, 373	12, 605	3, 687	0.39	Baños

Suecia	36, 000	10, 000	3, 840	0.3	Bombas de Calor
Estados Unidos	31, 239	8, 678	7, 817	0.13	Bombas de Calor
Turquía	28, 840	6, 900	1, 495	0.53	Baño/Calefacción
Islandia	24, 500	6, 806	1, 844	0.42	Calefacción urbana
Japón	10, 301	2, 862	822	0.4	Baños
Italia	7, 554	2, 098	607	0.39	Baños / Spas
Hungría	7, 940	2, 206	694	0.36	Baños / Spas
Nueva Zelanda	7, 086	1, 968	308	0.73	Industrial
Brasil	6, 622	1, 840	360	0.58	Baños / Spas

Nota: Factor de capacidad = Utilización anual (TJ/año) /Capacidad (MWt) x 0.03171

1.2.2.- Aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía para generación eléctrica.

Como ya se ha mencionado, las mayoría de las aplicaciones que se le da a la energía geotérmica de baja entalpía en el mundo es para usos directos sin embargo, la producción de energía eléctrica con este tipo de recursos ha tomado gran importancia en los últimos años, pues están bastante más adaptables debido a la disponibilidad de yacimientos con un potencial geotérmico de menos entalpía, pero más adecuado a necesidades puntuales.

Estas pequeñas centrales eléctricas geotérmicas, de hasta 5 MW, tienen un grado de viabilidad muy superior a las de potencia más elevada. Autores como (Entingh, 1994), apuntan una serie de ventajas que aconsejan el empleo de estas centrales siendo la mayor de estas, que existen en el mundo mayor número de yacimientos de baja entalpía que los de media y alta entalpía.

- Pueden construirse en módulos transportables de muy baja potencia (100-300 kW), de muy reducido tamaño, lo cual no impide colocar varios módulos en un mismo sitio y así conjuntar el pequeño potencial llegando a tener plantas con potencia más considerable, todo depende del recurso geotérmico que se tenga en el sitio.
- Pueden trabajar aisladas, alimentando a un pequeño consumidor desconectado de la red, ya que son muy flexibles, pudiendo trabajar al 25% de su potencia nominal en buenas condiciones.
- Su versatilidad permite un diseño automático muy sencillo, que les confiere un alto grado de su funcionamiento autónomo.
- Al ser de baja potencia, su alimentación puede reducirse a un pozo único de alimentación, dos a lo mucho, lo que reduce la operación y los costos.
- La inversión es bastante reducida comparándolo con las centrales de mayor tamaño, contemplando que para cualquier aprovechamiento geotérmico para generación eléctrica se necesita hacer una inversión en la exploración del campo geotérmico pero los pozos de exploración serían de menor profundidad reduciendo los costos.

El ciclo de generación más utilizado para este tipo de fuentes de energía geotérmica son los ciclos binarios, a continuación se mencionarán algunas de sus características.

Las centrales geotérmicas con ciclo binario tienen un principio termodinámico de funcionamiento similar a las centrales convencionales de combustible fósil o nuclear, en las que el fluido de trabajo circula por un

circuito cerrado. Las centrales de ciclo binario trabajan con un fluido secundario con un punto de ebullición menor al del agua y de diferentes propiedades termodinámicas. Dicho fluido de trabajo recibe calor del fluido geotérmico en un intercambiador de calor (de tubos y coraza) y es vaporizado y utilizado para mover la turbina. Al salir de la turbina es condensado y reutilizado en un circuito cerrado.

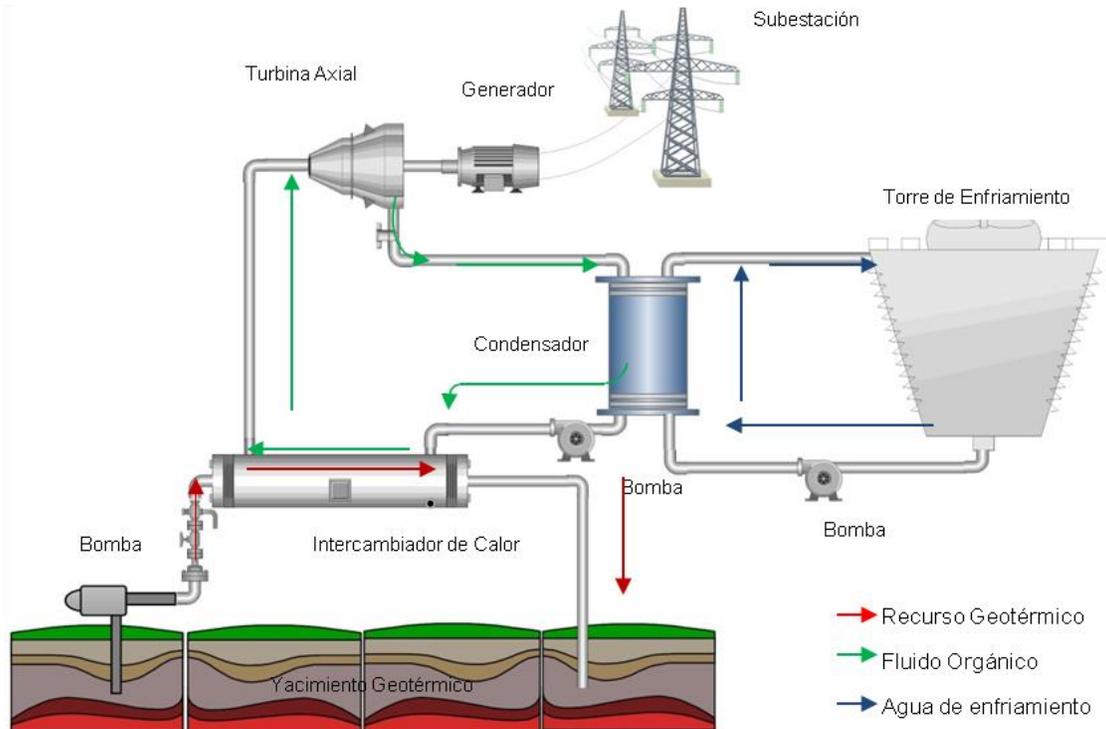


Figura 1.15.- Ciclo Binario de generación eléctrica utilizando la energía geotérmica (iiDEA 2014)

La primera central geotérmica de ciclo binario para generar electricidad empezó a operar en 1967, en la península Rusa de Kamchatka. Se trataba de una planta de 670 kW que proporcionó electricidad y calor a una aldea y granjas cercanas. Desde hace algunos años se han añadido plantas binarias a centrales del tipo de condensación, de forma que se pueda aprovechar el calor de la salmuera de desecho antes de reinyectar de nuevo al reservorio geotérmico.

Cuando la temperatura del fluido geotérmico es de 150 °C o menos, resulta difícil (aunque no imposible) construir una planta a condensación que pueda funcionar de forma eficiente y económica. Y cuanto menor es la temperatura del recurso, mayores las dificultades para implantar dicha tecnología. De hecho, a temperaturas tan bajas es improbable que los pozos fluyan de manera espontánea, y en caso de que lo hagan, existe mucha probabilidad de que se produzca depósito de calcita en los mismos. Por ello la importancia de estos ciclos para el aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía. La empresa Ormat es la líder en la instalación de plantas de ciclo binario, alrededor del mundo se han puesto en marcha decenas de plantas de ciclo binario incluyendo México, En la figura siguiente se puede observar el potencial de generación eléctrica con este tipo de tecnología.



Empowering the World We Share
Meeting the Needs of Customers in 71 Countries

Global Solutions to Meet Local Needs

Ormat specializes in the development of locally available energy sources into state-of-the-art, environmentally-sound power plants, delivering clean, reliable and sustainable electricity in remote locations, and to national grids on six continents. The company also supplies high reliability, maintenance-free remote power units to support major pipelines and telecommunication networks in some of the world's most forbidding regions.



Figura 1.16.- Lugares donde la empresa “Ormat” ha instalado plantas de ciclo binario (ORMAT 2010)

La CFE ha instalado plantas de ciclo binario en tres zonas geotérmicas, Las Tres Vírgenes Baja California Sur, Los Azufres Michoacán y Maguarichi Chihuahua, este último cobra importancia debido a que se instaló aislado de la red eléctrica nacional y le dio energía eléctrica a 600 personas en el poblado de Maguarichi siendo el primer proyecto geotérmico independiente de la red en México (ver figura 1.17) lamentablemente ninguna de las plantas instaladas en México está en operación actualmente.



Tres Vírgenes



Los Azufres



Maguarichi



Figura 1.17.- Plantas de ciclo binario instaladas en México

1.2.3.- Potencial energético de geotermia de baja entalpía en México, lugares más factibles.

México tiene un gran potencial Geotérmico, como se muestra en la Figura 1.11, la energía geotérmica de baja entalpía en México tiene un potencial probable de generación de 200 MWe (Ordaz y Flores 2011) instalando plantas pequeñas de generación. Se tiene que tomar en cuenta que los puntos que se muestran en la figura es solo la exploración de CFE, por lo cual se deben sumar los puntos calientes investigados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM y los puntos geotérmicos ciegos, los cuales no tienen emanaciones geotérmicas superficiales y para hallarlos se necesitaría una exploración más a detalle. Por lo cual cobra importancia mencionar los puntos encontrados por el Instituto de Ingeniería en la península de Baja California y dejar como posibles, los puntos geotérmicos ciegos de la República Mexicana.

Estudio de los recursos geotérmicos de Baja California

El Instituto de Ingeniería y el Instituto de geofísica, han implementado un plan de desarrollo tecnológico para evaluar y caracterizar los recursos geotérmicos, de agua caliente de mar o de pozo (60-140°C) de la península de Baja California: se detectaron muchos puntos donde se pueden obtener grandes volúmenes de agua a temperaturas superiores a los 130°C a la salida del pozo, sólo con perforar pozos de 100 a 200 metros; y la finalidad es ubicar el mejor sitio para la perforación de un pozo que provea fluido caliente a temperaturas cercanas a los 200°C, según las estimaciones (Galván y Prol Ledesma, 2015). Como resultado de estas inspecciones preliminares, se localizaron zonas de interés como: Los Cabos, La Paz, Puertecitos, San Felipe, Punta Banda, entre otros (Figura 1.18). En Los Cabos, al perforar uno de los pozos playeros para alimentar una planta desaladora de agua por ósmosis inversa, se encontraron temperaturas del agua de hasta 84 °C a sólo seis metros de profundidad; de manera análoga al realizar este estudio en las playas de Punta Banda se encontraron manantiales con agua salobre con temperaturas mayores a los 50 °C en la superficie México (Alcoer y Hiriart 2008)



Figura 1.18.- Recursos geotérmicos en la península de Baja California

De las zonas exploradas, La Joya, en Ensenada, es uno de los sitios encontrados con mayor potencial geotérmico de baja entalpía, por lo que se han realizado campañas de exploración geotérmica detallada, para evaluar el potencial energético de la zona y se han encontrado temperaturas de hasta 93°C a un metro de profundidad (Aviña y Monzalvo 2008).

Estos puntos geotérmicos son de vital importancia para este estudio, debido a que se presenta el recurso geotérmico cerca de las playas y con ello se tiene la posibilidad de desalar agua de mar ocupando energía geotérmica.

1.3.- DESALACIÓN

Los procesos de desalación requieren cantidades importantes de energía para lograr la separación de las sales, esto es de gran relevancia, porque en muy pocos lugares en el mundo donde se tiene escases de agua potable y se tienen fuentes de agua salada o salobre, cuentan con la suficiente infraestructura energética para acceder al desarrollo de estas tecnologías a costos competitivos. Muchos países en el Medio Oriente, debido a los ingresos del petróleo, tienen dinero suficiente para invertir en equipos y ejecutar la desalinización. La capacidad instalada de los sistemas de agua desalada en el año 2000 fue de unos 22 millones de m³/día distribuida en 120 países aumentado drásticamente en estos años y se espera siga aumentando en las siguientes décadas. Se ha estimado que la producción de esta capacidad de agua desalada en el año 2000 requirió unos 203 millones de toneladas de petróleo por año, alrededor de 2.36×10^{12} kWh/año de combustible (Kalogirou 2005). Del 2000 al 2007 la capacidad de desalación a nivel mundial se quintuplicó llegando a ser más de 110 millones de m³/día, siendo cerca de más del 60% producidas en unidades con capacidades mayores o iguales a los 100 m³/día (DME, 2009) la “Figura 1.19” muestra la evolución de la desalación desde 1980 hasta el año 2009.

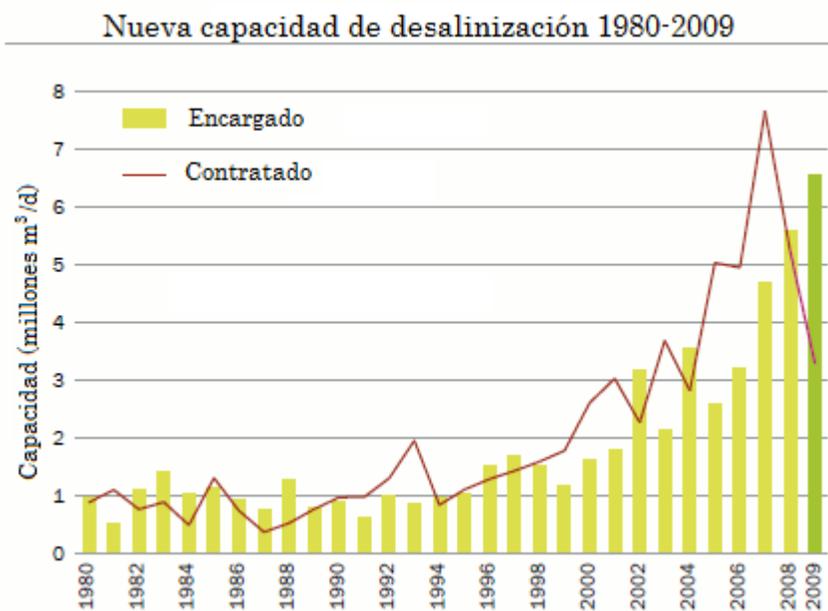


Figura 1.19.- Capacidad de desalación mundial (IDA 2009)

Las principales tecnologías de desalación se pueden dividir en dos categorías principales; las térmicas de Destilación de Múltiple Efecto (MED, por sus siglas en inglés), Multi-Etapas Flash (MSF, por sus siglas en inglés) y la Osmosis Inversa (RO) (AMTA, 2007), además hay otras tecnologías híbridas, las cuales se integran a las térmicas y las de Osmosis inversa (O.H. Hamed, 2005). La tecnología más aplicada es MSF, clasificada dentro de las térmicas, con cerca del 54% instalado, siguiéndole la tecnología por Osmosis Inversa (tecnología de membrana) con el 28% y MED (térmica) con el 9% (Desaldata, 2009). Con respecto a cada continente, cerca del 60% de las plantas instaladas en Europa, América, Asia y África emplean la tecnología de Osmosis Inversa, en contraste con el Medio Oriente donde el 80% del agua desalada proviene de plantas MSF, donde, a pesar de ser una zona pequeña, más del 80% del agua mundial se desala ahí. Países como Qatar y los Emiratos Árabes Unidos tienen una capacidad instalada *per cápita* de 1,750 m³/día, siendo el valor promedio mundial *per cápita* de 200 m³/día, lo que nos habla de las necesidades y de las grandes inversiones que se han realizado en esos países para el consumo y distribución del agua.

A continuación, se presentan la “Tabla 1.3” y la “Figura 1.20”, donde se realiza una comparativa de las tecnologías de desalación (DME, 2009)

Tabla1.3.- Comparativa de las tecnologías

	MSF ^a	MED ^b	MED/TVC ^c	MVC ^d	RO ^e	ED ^f
Temperatura Operativa Máxima típica [°C]	< 120	< 70	< 70	< 70	<40	<40
Suministro de energía	Vapor	Vapor	Vapor	Mecánica (energía eléctrica)	Mecánica (energía eléctrica)	Energía eléctrica
Consumo de Energía Térmica [kJ/kg de destilado]	250-400	250-400	250-400	-	-	-
Consumo típico de energía eléctrica[kWh/m ³]	4.5	1.5	1.5	8.0-14	4.0-6.2	1.0
Contenido de sales típico del agua de alimentación [ppm TDS]	30,000 - 100,000	30,000 – 100,000	30,000 – 100,000	30,000 – 50,000	1,000 – 45,000	100 – 3,000
Calidad del agua producto [ppm TDS]	<10	<10	<10	<10	<500	<500
Producción típica por etapa [m ³ /día]	5,000 – 76,000	500- 15,000	100 - 22500	10– 3,000	1 - 10,000	1 – 12,000

- a. MSF: Multi Etapas Flash
- b. MED: Destilación de Múltiple efecto
- c. MED/TVC: Destilación de Múltiple efecto con Compresión Térmica de Vapor
- d. MVC: Compresión Mecánica de Vapor
- e. RO ; Osmosis Inversa
- f. ED: Electrodiálisis

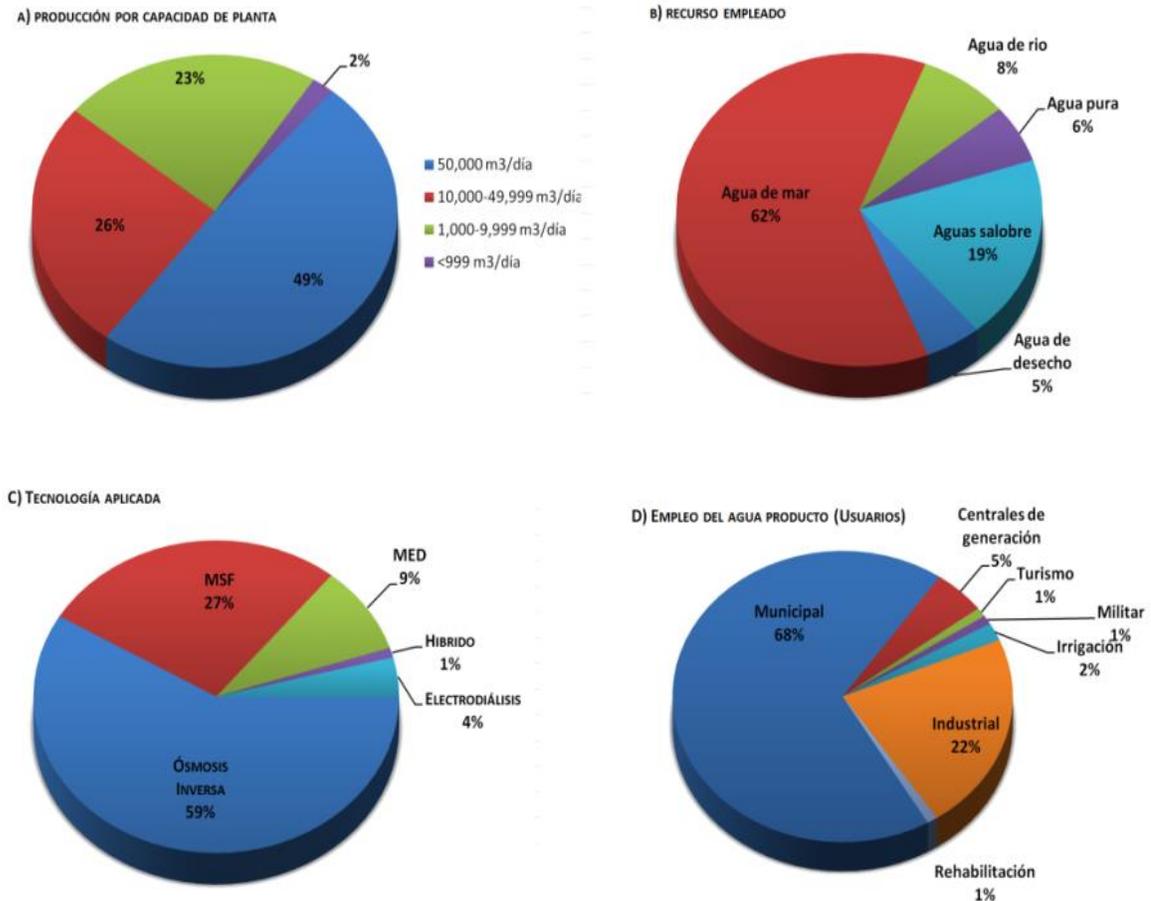


Figura 1.20.- Capacidad instalada por tamaño de las unidades, calidad del agua empleada, tecnología y empleo del agua tratada

En la figura 1.20 parte “C” se muestra que la Osmosis Inversa es la tecnología más empleada en cuanto a la desalación de la cual la mayoría es con recurso de agua de mar.

En las islas con alto desarrollo poblacional e industrial, como Singapur, Malta, Canarias, Trinidad y Tobago y otras, la escasa cuenca que tienen para captar agua de lluvia los lleva a depender de la desalación de agua del mar para satisfacer su demanda. El más reciente fenómeno social que ha venido a detonar el despegue de la tecnología para desalar agua de mar, ha sido el incremento de la población, y por tanto de la demanda en grandes ciudades como Los Ángeles y San Diego, en California; Tampa, en Florida, así como muchas ciudades del sureste de España.

México no escapa a la problemática del incremento de la demanda en grandes ciudades; tal es el caso de Tijuana, Ensenada y Hermosillo, de islas como Cozumel y las Islas Marías, y de muchos otros sitios donde la contaminación salina ha estropeado antiguos pozos que abastecían de agua dulce a estas localidades. En México existen 320 sitios donde están instaladas desaladoras, en estos hay 435 plantas (IDA 2006). Gran parte de estas plantas no corresponden al nivel industrial o municipal sino al comercial, ya que pertenecen la mayoría al sector hotelero costero y del total de las plantas, alrededor del 76% funcionan a partir del principio de osmosis inversa.

1.3.1.- Tipos de desalación

Hay básicamente dos familias de tecnologías de desalación usadas en todas partes del mundo. Estas incluyen tecnologías térmicas y tecnologías de membranas. Las tecnologías térmicas son las que calientan el agua salada y recogen el vapor condensado (destilación) para producir agua pura. Rara vez se utilizan los procesos de destilación para desalar agua salobre, ya que no son rentables para esta aplicación. Las tecnologías térmicas incluyen los siguientes tipos de procesos:

- Destilación de Multi-Etapas Flash (MSF)
- Destilación de Múltiple Efecto (MED)
- Compresión de vapor (VC)

Fundamentos de los Procesos Térmicos

Los procesos de desalación térmicos actualmente empleados tienen principios muy similares y se pueden esquematizar en subsistemas básicos. En general, como se ilustra en la “Figura 1.21”, se tiene una etapa de toma de agua que se envía a un pretratamiento para eliminar sólidos disueltos de mayor tamaño, materia orgánica suspendida o neutralización del pH. Una vez realizado el proceso anterior, es cuando pasa el proceso de destilado, ya sea que se emplean sistemas MSF, MED o VC. En esta etapa es cuando se requiere de una fuente de calor para la operación, usualmente se emplea vapor. Del proceso de destilado se obtiene una purga o concentrado y un destilado. El destilado se envía a una etapa postratamiento para agregar las sales y minerales para obtener el agua producto (Zawya, 2010).

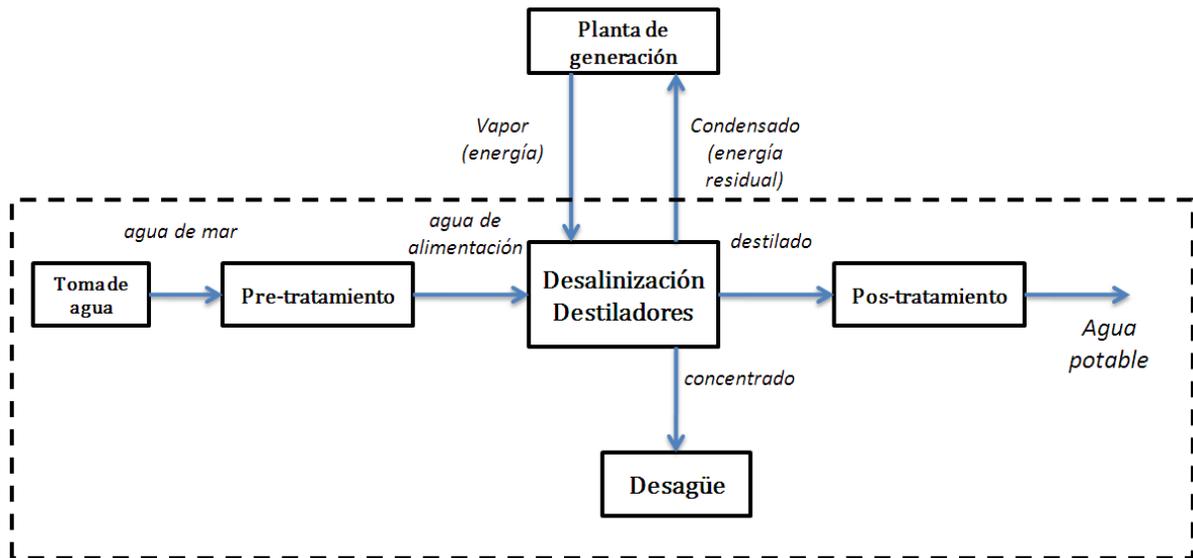


Figura 1.21.- Sub-Sistemas en un planta desaladora

1.3.2.- Necesidades energéticas de las desaladoras

La energía mínima teórica para desalar agua de mar teniendo una recuperación de agua dulce aceptable es de 3 kJ/kg (Spiegler y El-Sayed, 1994), este valor va creciendo a medida que aumenta la recuperación de agua dulce, debido a que la solución restante está más concentrada y consecuentemente el punto de ebullición se eleva un poco más. En la “Tabla 1.4” se muestra la energía relativa requerida en los principales procesos de desalación, en la cual, se puede visualizar que las desaladoras térmicas tienen una necesidad de energía eléctrica, por consiguiente, para cubrir totalmente las necesidades energéticas de las desaladoras térmicas se necesita tener la disponibilidad de energía eléctrica y térmica.

Tabla 1.4.- Comparativa de las necesidades energéticas de los principales procesos de desalación (Miller, 2003).

Proceso	Relación de Ganancia de Salida ^a	Consumo de Energía Eléctrica (kWh/m ³)	Consumo de Energía Térmica (kWh/m ³)	Consumo Total de Energía (kWh/m ³)
MSF	8-12	32.25-3.75	6.75-9.75	10.5-13
MED	8-12	2.5-2.9	4.5-6.5	7.4-9
MED-TVC	8-14	2.0-2.5	6.5-12	9-14
MVC	N/A	9.5-17	N/A	9.5-17
BWRO ^b	N/A	1.0-2.5	N/A	1.0-2.5
SWRO ^c	N/A	4.5-8.5	N/A	4.5-8.5

a- La proporción de la producción de agua dulce (Destilado)

b- Osmosis Inversa con agua salobre

c- Osmosis Inversa con agua de mar

Lo que se busca, es que estos consumos energéticos se cubran en algún porcentaje o en su totalidad por energías renovables aprovechables en el sitio.

1.4.- DESALACIÓN DE AGUA DE MAR CON ENERGÍAS RENOVABLES

En los últimos años, debido a la gran aportación de nuevas tecnologías e investigación en el campo de la desalación de agua de mar apoyada con energías renovables y los avances en las plantas desaladoras convencionales (térmicas y eléctricas). Se tiene un importante aumento de eficiencia y reducción de costos en estas tecnologías, que hacen competitivas esta combinación de técnicas (Leitner, 1998). En el mundo ha habido algunas plantas demostrativas implementando esta combinación de tecnologías obteniendo poco volumen desalado, hasta 100 m³/día (MEDEC R&D Report, 2001). La mayoría de las propuestas son desaladoras apoyadas con energía solar de las cuales la minoría ha tenido éxito industrial, sin embargo han servido de base a la investigación de nuevas tecnologías y al aumento de eficiencia de estas.

No todas las combinaciones de energías renovables apoyando a la desalación de agua de mar son adecuadas ya que se deben evaluar varios factores, como las condiciones geográficas, la topografía del lugar, la calidad del agua a desalar, la infraestructura, la capacidad y la disponibilidad de las energías renovables. En muchos lugares de México se cumple satisfactoriamente con los requisitos necesarios para combinar las dos tecnologías. En la “Figura 1.23” se ilustran las posibilidades de combinación de las principales energías renovables y a la desalación.

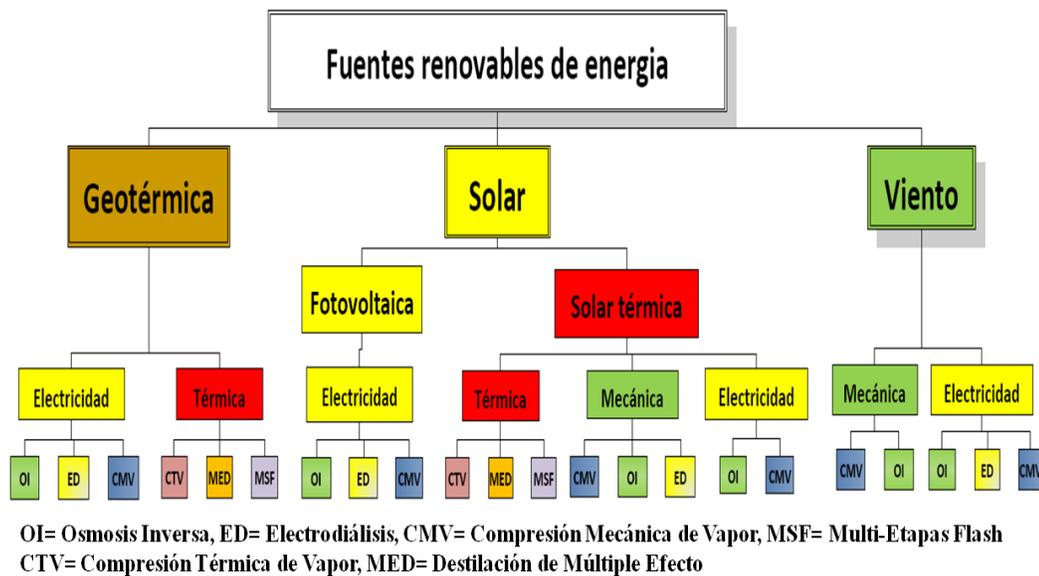


Figura 1.22.- Combinación de las energías renovables con los métodos de desalación (Eltawil, 2009)

Para las plantas desaladoras que tienen demanda de energía eléctrica la opción que más se ha utilizado en el mundo es la apoyada con paneles fotovoltaicos, la cual es una buena solución para lugares aislados y para plantas de tamaño pequeño (Tzen y Morris, 2003). En cuanto a las plantas desaladoras que tienen una mayor demanda de energía térmica la tendencia se dirige a la combinación de energía solar y energía geotérmica, las cuales son las opciones más comúnmente utilizadas para la desaladoras y los procesos de destilación. En la “Figura 1.24” se muestra los porcentajes de utilización de energías renovables para apoyar a la desalación y las tecnologías de desalación.

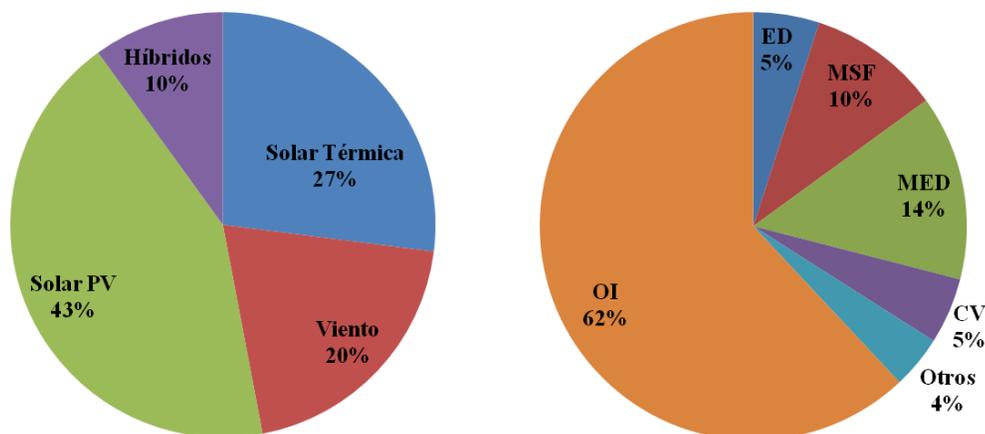


Figura 1.23.- Procesos de desalación y su recurso energético impulsado por energías renovables (Mathioulakis et al, 2007).

1.4.1.- Desalación de agua de mar con energía geotérmica

A pesar de que la energía geotérmica por su naturaleza no está disponible en algunos países, debido a su posición geográfica y que las tecnologías renovables más utilizadas son la solar y la eólica en el mundo, la geotermia presenta grandes ventajas sobre estas tecnologías debido a que las plantas geotermoeléctricas tiene factor de planta arriba del 80% teniendo un recurso continuo, el almacenamiento de energía térmica es natural, es predecible (Barbier, 2002) y es la energía renovable con el mejor costo por kWh, como se puede observar en la “Tabla 1.5”. La geotérmica de alta entalpía permite el uso directo mecánicamente de potencia en el eje de las bombas de alta presión de las desaladoras por osmosis inversa y la geotermia de media y baja se podría ocupar mediante sistemas de aprovechamiento de uso directo.

Tabla1.5.- Energía y costos de inversión para producción de energía eléctrica mediante fuentes renovables (Dickson et al, 2009)

Tipo de Renovable	Costo actual de la energía US¢/kWh	Posible costo futuro de la energía US¢/kWh	Costo de la planta a la entrega US\$/kW
Biomasa	5 - 15	4 - 10	900 - 3000
Geotérmica	2 - 10	1 - 8	800 - 3000
Eólica	5 - 13	3 - 10	1100 - 1700
Solar (Fotovoltaica)	25 - 125	5 - 25	5000 - 10 000
Solar (electricidad térmica)	12 - 18	4 - 10	3000 - 4000
Mareomotriz	8 - 15	8 - 15	1700 - 2500

La utilización de la geotermia directamente como energéticos a las plantas de desalinización es algo ya estudiado y probado en algunas lugares con potencial geotérmico, además, con lo recientes avances en la tecnología de los materiales para aumentar la transferencia de calor y la resistencia a la corrosión, nos da como resultado que la utilización de geotermia como uso directo a 60 °C mínimo, se ha convertido en una solución prometedora (Houcine et al, 1999). Estos son algunos casos a nivel mundial de la utilización de la geotermia como recurso principal de energía para las plantas desaladoras.

Casos de estudio de aprovechamiento geotérmico para la desalación

El primer caso de estudio se presentó en los Estados Unidos en los años setentas mediante varias pruebas realizadas de utilizar el recurso para tecnologías de desalación MSF y ED (Awerbuch et al, 1976), en la nación de Argelia la cual tiene un gran potencial geotérmico de baja entalpía alcanzando temperaturas de hasta 98 °C a niveles someros, específicamente en las zonas norte de Argelia del Atlas Atiliano, el Altiplano y el Atlas Sahariano (Fekraoui and Kedaïd, 2005), se propuso un invernadero en el cual se calentara el agua de mar con el recurso geotérmico y se recuperara el destilado, todo esto apoyado con energía solar realizando un sistema híbrido (Mahmoudi et al, 2010), como este caso se han hecho muchas pruebas de complementar a la energía solar con la energía geotérmica. El único caso de estudio, hasta el momento, en el que se maneja una aplicación de desalación totalmente cubierta con energía geotérmica es el caso de Milos Grecia. La isla de Milos Grecia está ubicada en el arco volcánico del Egeo y se caracteriza por la abundancia de recursos geotérmicos (Karytsas et al, 2004). El objetivo principal del proyecto de la isla de Milos fue construir y operar una planta geotérmica de baja entalpía mediante un ciclo binario orgánico con una capacidad de 470 kWe y con una eficiencia del 7%, la cual le daría la energía térmica y eléctrica a una planta desaladora (Destiladora) tipo MED, la cual tendría una capacidad de 80 m³/h. La única fuente de energía para el proyecto de la Isla de Milos fue el calor geotérmico. La unidad se prevé que sea totalmente autosuficiente en energía térmica y eléctrica. El costo de esta planta desaladora sería de 1.5 euros por cada metro cubico desalado. Los pozos ocupados para la planta geotérmica tienen un rango de temperaturas de 55 a 100°C (EGEC, 2001) con una profundidad que va desde los 70 a los 185 m dando un gasto de fluido geotérmico de 550 m³/h. Las conclusiones de estas aplicaciones en Grecia demostraron la viabilidad de acoplar la tecnología de la desalación con geotermia de baja entalpía.

CONCLUSIONES

El uso de tecnologías energéticas renovables como la geotérmica, para la desalación de agua de mar y generación eléctrica, presenta en el mundo aplicaciones muy escasas, dado que se debe combinar una serie de factores como lo son; la existencia de potencial geotérmico disponible en el sitio, necesidades de agua potable que no puedan ser cubiertas en forma convencional en el sitio y fuentes de agua no potables disponibles en la zona. Estas circunstancias alrededor del mundo son muy escasas, en los desiertos se tendrían dos de estas pero no necesariamente el recurso geotérmico, en México se presenta esta circunstancia, por lo cual México tiene la posibilidad de estudiar, analizar, desarrollar y optimizar esta aplicación, como en muy pocas partes en el mundo.

Al realizar el primer capítulo del trabajo se establecen las bases y la investigación recopilada de la CFE y el Instituto de Ingeniería para detectar las zonas potenciales donde se puede combinar la desalación de agua con la energía geotérmica indicando que la Península de Baja California cumple con los requisitos para probar e instalar sistemas aislados de generación y desalación.

2.- ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS CONVENCIONALES Y DE LA OPCIÓN DE ACOPLAMIENTO PWG Y MED-LE

INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se presentarán los sistemas de generación de energía y desalación involucrados en este tema de investigación, haciendo un análisis técnico y energético de los diferentes componentes de los sistemas, obteniendo las necesidades energéticas y las áreas de oportunidad que se presenten en estos, para hacer un sistema híbrido eficiente que genere energía eléctrica y a su vez desale agua de mar aprovechando la energía geotérmica de baja entalpía. Una vez identificado el esquema de acoplamiento del sistema híbrido se realizará un análisis operativo y de desempeño del acoplamiento entre los sistemas PWG y MED-LE.

2.1.- ANÁLISIS TÉCNICO Y ENERGÉTICO

2.1.1.-Ciclo binario

Como ya se mencionó en el **capítulo 1.2.2**. Las centrales geotérmicas con ciclo binario tienen un principio termodinámico de funcionamiento similar a las centrales convencionales de combustible fósil, en las que el fluido de trabajo circula por un circuito cerrado. En una planta de ciclo binario el calor del agua geotérmica se transfiere a un fluido de trabajo secundario, por lo general un fluido orgánico que tiene un bajo punto de ebullición y presión de vapor elevada en comparación con el agua a una temperatura dada. El agua geotérmica enfriada es reinyectada al yacimiento por medio de un pozo de reinyección para recargarlo y de esta forma tratar de mitigar un impacto ambiental (**ver figura 1.15**). Esta planta geotérmica no tiene emisiones a la atmósfera excepto por el vapor de agua de las torres de enfriamiento (sólo en el caso de torres de enfriamiento húmedas) y las pérdidas de fluido de trabajo. Por lo tanto, los problemas ambientales que pueden estar asociados con la explotación de los recursos geotérmicos de alta temperatura, como la liberación de gases de efecto invernadero (como el CO₂ y CH₄) y el derrame de elementos tóxicos (por ejemplo, Hg y As), se evitan con esta forma de aprovechar el recurso. Otra ventaja de la tecnología binaria es que los fluidos geotérmicos (o salmueras) no entran en contacto con los componentes mecánicos móviles de la planta (por ejemplo, la turbina), asegurando una vida más larga para el equipo.

Las plantas binarias han permitido la explotación de un gran número de campos que pueden haber sido muy difícil (o poco rentables) con otras tecnologías de conversión energética, lo que aumenta significativamente el desarrollo de los recursos geotérmicos en todo el mundo (Schochet, 1997, DiPippo, 2004).

El diseño de las plantas de ciclo binario, aunque ampliamente abordado en la literatura Por ejemplo; Gnutek y Bryszewska Mazurk, 2001; Kanoglu, 2002; Di Pippo, 2004; Hettiarachchi et al, 2007; Kaplan, 2007; Kose, 2007; Moya y DiPippo, 2007, sigue siendo un área importante de investigación que sigue activa. En la actualidad, esta tecnología no es capaz de proporcionar "Una planta estándar" en una etapa de desarrollo, es decir una planta igual para todos los campos ya que cada instalación debe estar diseñada para las condiciones de una ubicación dada, de acuerdo a sus condiciones geotérmicas y ambientales. Cada sistema se adapta a las características específicas de fluidos geotérmicos: los grandes fabricantes en este campo, como Ormat (ver figura 1.16), Trench Mafi, Siemens y UTC Power han adoptado este enfoque.

Para los sistemas geotérmicos de baja entalpía que se pueden aprovechar y que sólo producen agua caliente (no vapor), las centrales geotermoelectricas de ciclo binario muestran valores muy bajos de eficiencia de primera ley (5-12%), e incluso la eficiencia de segunda ley están típicamente en el rango de 25 a 45% (Kanoglu, 2002; Kose, 2007; Moya y DiPippo, 2007). En los últimos años se han realizado muchos estudios, los cuales tienen como objetivo intentar aumentar la eficiencia de las plantas de ciclo binario, que se concentran principalmente en realizar modificaciones en los sistemas de combinación del fluido de trabajo y el ciclo de recuperación de calor (intercambiadores de calor).

Entre los principales modificaciones planteadas están, DiPippo 2007, quien propuso un intercambiador de recuperación de calor con una cascada de evaporadores y el uso de un fluido de componentes múltiples de trabajo (como lo es en un ciclo de Kalina), mientras que Kanoglu (2002) propone que un ciclo de recuperación con una turbina de alta y una turbina de baja presión. Gnutek y Bryszewska-Mazurk (2001) proponen una planta de generación con más de dos niveles de presión, y Gu y Sato (2001) estudiaron el uso de ciclos binarios supercríticos.

Para poder diseñar una planta de ciclo binario se deben considerar varios factores en sitio, como la altitud, clima etc. Debido a la gran variación que se pueden encontrar en las temperaturas de la salmuera geotérmica del yacimiento (fluido de baja entalpía) en sus presiones y composiciones químicas, hace muy difícil la selección del fluido de trabajo. Otra consideración importante está en el ciclo de recuperación de calor, y el dimensionado de los dispositivos de transferencia de calor.

Uno de los problemas de las plantas de ciclo binario y que no es mencionado muchas veces en los artículos relacionados, es la del rechazo de calor a baja temperatura en el condensador (contaminación térmica). Ya que si no hay una fuente adecuada de agua disponible, es necesario utilizar un sistema de enfriamiento seco (como las torres de enfriamiento secas). Aunque este sistema soluciona el problema de suministro de agua, plantea muchos otros que se mencionan a continuación.

El consumo de energía para usos propios es relativamente alto, debido a la necesidad de ventilación forzada en un sistema de enfriamiento seco puede absorber del 10-12% de la potencia bruta (en condiciones ideales), hasta tanto como 40-50% si la temperatura ambiente es muy cercana a la temperatura de condensación por lo que los usos propios son muy altos con este sistema de refrigeración. El costo de capital es también bastante alto; 30-35% del costo de capital total del proyecto geotérmico (Franco y Villani 2007). Por ejemplo, en el caso de las plantas geotérmicas instaladas en el campo geotérmico Los Azufres México (ver figura 1.17) el sistema de enfriamiento se realizó con torres de enfriamiento secas, lo cual hizo menos rentable la planta y a la larga estos inconvenientes se suman a las problemáticas del mantenimiento en el intercambiador de calor debido a las incrustaciones, provocando que estas plantas ya no estén en funcionamiento en el campo geotérmico de Los Azufres (figura 2.1).



Figura 2.1.- Planta de ciclo binaria instalada en el campo geotérmico de Los Azufres México

El costo relativamente alto de las plantas de ciclo binario puede haber limitado el número de instalaciones en todo el mundo más no ha sido un impedimento para que en el mundo se siga probando con esta tecnología.

Hoy en día las centrales de ciclo binario son el tipo de planta geotérmica más utilizado para generar electricidad. En Julio de 2004 había 155 unidades en operación, generando 274 MW de electricidad en 16 países. Sin embargo, a pesar de constituir el 33% de todas las unidades geotérmicas en operación en el mundo, las plantas de ciclo binario generan solamente el 3% de la energía eléctrica total. La media de generación era sólo de 1,8 MW por unidad.

Para el 2006, la potencia total instalada en el mundo de las plantas geotérmicas binarias fue de unos 700 MWe, lo que representa alrededor del 8% de la potencia geotérmica instalada en el mundo lo cual indica que ha estado en aumento considerablemente el uso de esta tecnología alrededor del mundo (Tabla 2.1).

Tabla 2.1.- Capacidad geotérmica instalada por tecnología de generación (Bertani 2006)

Tipo de Planta	Capacidad Instalada MWe	(%)
Vapor seco	2545	28
Un separación	3294	37
Doble separación	2293	26
Binaria/Combinada	682	8
Contrapresión	119	1
TOTAL	8933	100

Hasta febrero del 2012 el total de la capacidad instalada de generación con energía geotérmica es de 10,975.6 MWe (Asociación Geotérmica Mexicana, 2016) y aproximadamente 1,650 MWe es decir el 15% está siendo generada por plantas de ciclo binario.

El fluido orgánico que es el fluido de trabajo en el ciclo binario convencional, realiza un proceso igual al que en un ciclo Rankine para la generación de energía eléctrica. Para el análisis energético de la planta de ciclo binario se elaboró una hoja de cálculo con la herramienta REFPROP 9.1 de Excel la cual ayudó a definir las propiedades termodinámicas de los fluidos (agua y orgánico) teniendo como base el siguiente esquema.

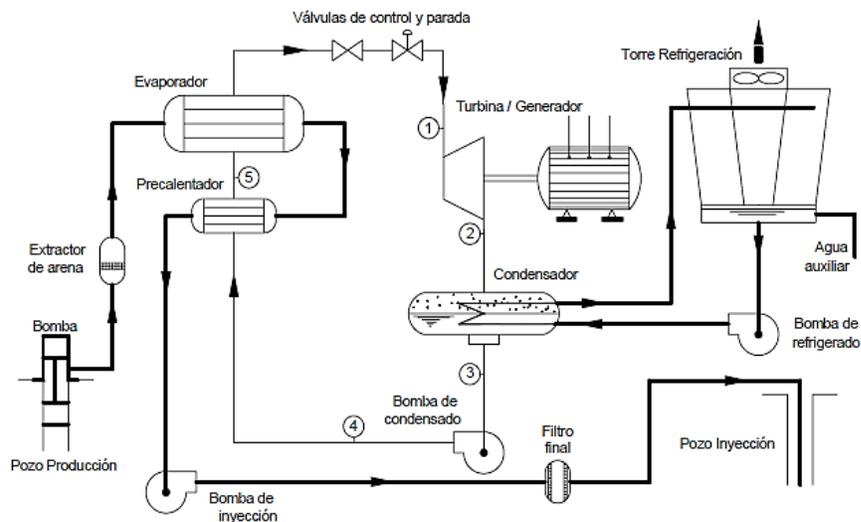


Figura 2.2.- Esquema del ciclo binario

En el esquema de la figura 2.2 se observan las dos etapas en el proceso de intercambio de calor. En el precalentador el fluido de trabajo alcanza su punto de ebullición y entra en el evaporador, del que sale en

estado de vapor saturado. El fluido geotérmico se mantiene en todo momento a una presión superior a la de evaporación correspondiente a su temperatura y a sus características propias del fluido geotérmico (salinidad), para evitar la evaporación o la aparición de gases incondensables que podrían afectar el intercambiador de calor con la deposición de calcita en las tuberías.

En la figura 2.3 se presenta el diagrama P-h que muestra los procesos termodinámicos por lo que pasa el fluido de trabajo a lo largo del ciclo binario convencional.

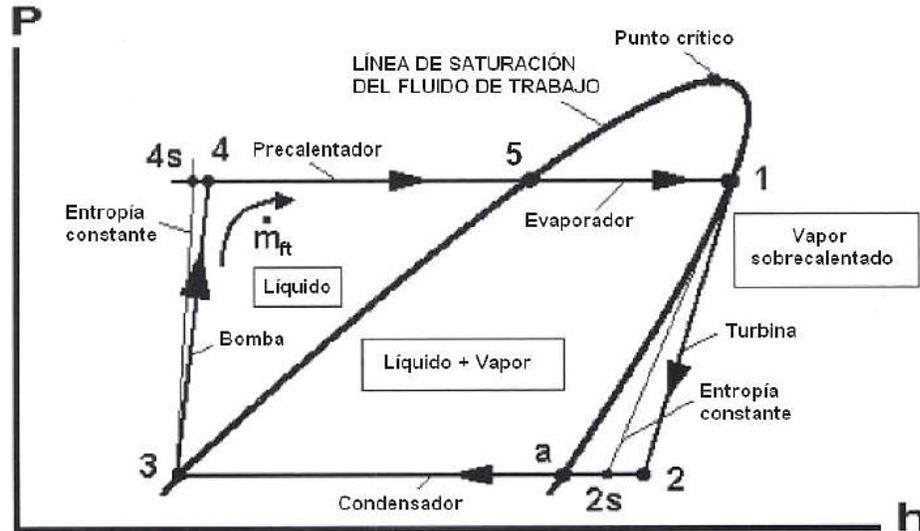


Figura 2.3.- Diagrama P-h de un fluido de trabajo típico en el ciclo binario.

Para la evaluación energética y el análisis termodinámico del ciclo se dividieron los componentes del ciclo binario para elaborar la hoja de cálculo, a continuación se mencionan los procesos y las consideraciones hechas.

Turbina

Para la simplificación de los cálculos se consideró despreciable la variación de las energías cinéticas y potencial entre la entrada y la salida de la turbina. Se supuso que la turbina está en un proceso adiabático y el flujo másico del fluido es continuo.

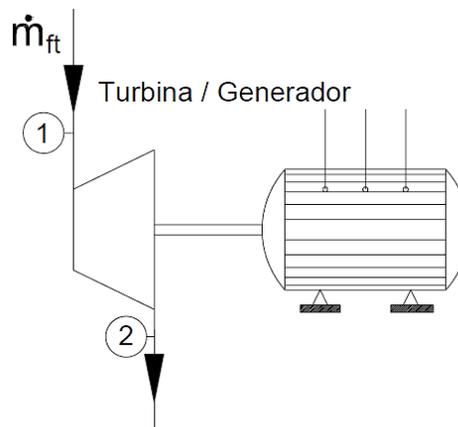


Figura 2.4.- Turbina y generador del ciclo binario convencional

La expresión para obtener el trabajo másico en la turbina está dada por la siguiente ecuación.

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{ft} \cdot (h_1 - h_2) = \dot{m}_{ft} \cdot \eta_t \cdot (h_1 - h_2) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

, donde η_t es la eficiencia isoentrópica de la turbina la cual es dato para los cálculos. Otro dato será la potencia de salida de la turbina con lo cual se determinará la masa del fluido de trabajo requerido y la velocidad de flujo.

Condensador

La expresión de calor que es necesario extraer al fluido de trabajo y transferir al medio refrigerante es:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{ft} \cdot (h_2 - h_3) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

La relación entre los flujos del fluido de trabajo y del agua para el sistema de refrigeración es:

$$\dot{m}_{ar} \cdot (h_y - h_x) = \dot{m}_{ft} \cdot (h_2 - h_3) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$\dot{m}_{ar} \cdot \bar{c} \cdot (T_y - T_x) = \dot{m}_{ft} \cdot (h_2 - h_3) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

, donde \bar{c} es el calor específico del agua para el sistema de refrigeración, que debido al pequeño salto térmico entre la entrada y la salida se puede tomar como constante. Para disipar la cantidad de energía térmica de desecho requerida, se tendrá que elegir entre un sistema de refrigeración seco o húmedo de acuerdo a las características del sitio.

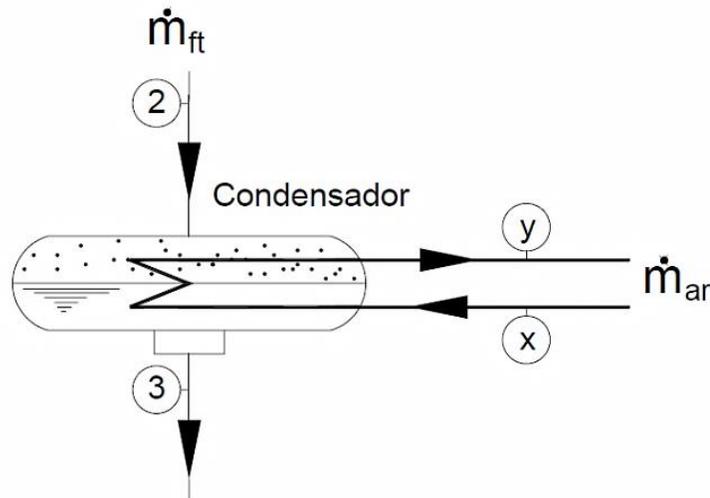


Figura 2.5.- Condensador del ciclo binario convencional

Bomba de condensado

Para la bomba del condensado se asumen las mismas consideraciones y simplificaciones que para los demás componentes del ciclo. La expresión para obtener la potencia de la bomba está dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{W}_B = \dot{m}_{ft} \cdot (h_4 - h_3) = \frac{\dot{m}_{ft} \cdot (h_{4s} - h_3)}{\eta_B} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

, donde η_B es la eficiencia isoentrópica de la bomba

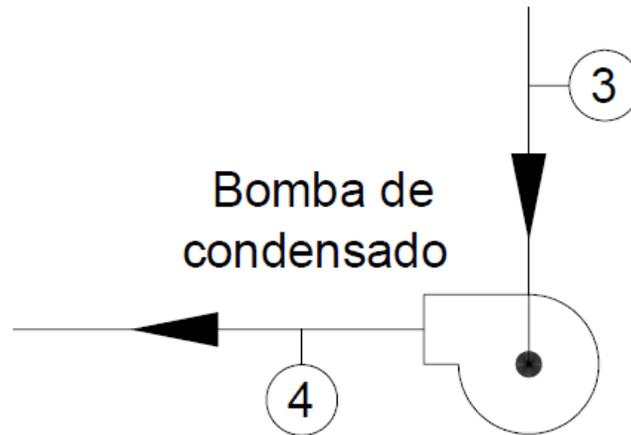


Figura 2.6.- Bomba de condensado del ciclo binario convencional

Intercambio de calor: precalentador y evaporador

El análisis de las partes que componen el intercambiador de calor, se realiza por medio del balance de masa y energía. Para elaborar la hoja de cálculo se consideró que el intercambiador de calor está suficientemente aislado térmicamente para que el intercambio de energía se dé solamente entre los fluidos de trabajo y geotérmico, también se consideró que los fluidos son continuos y la diferencia entre sus energías cinética y potencial es despreciable. De esta forma se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{fg} \cdot (h_a - h_c) = \dot{m}_{ft} \cdot (h_1 - h_4) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Si el fluido geotérmico tiene gases y sólidos poco disueltos, la parte de la izquierda de la ecuación 2.6 puede ser remplazada por:

$$\dot{m}_{fg} \cdot \bar{c}_{fg} \cdot (T_a - T_c) = \dot{m}_{ft} \cdot (h_1 - h_4) \quad (\text{Ec.2.7})$$

, donde \bar{c}_{fg} es el calor específico medio del fluido geotérmico.

El diseño de los intercambiadores de calor requiere analizar otro diagrama termodinámico: el diagrama Temperatura-Transferencia de calor o diagrama T-q

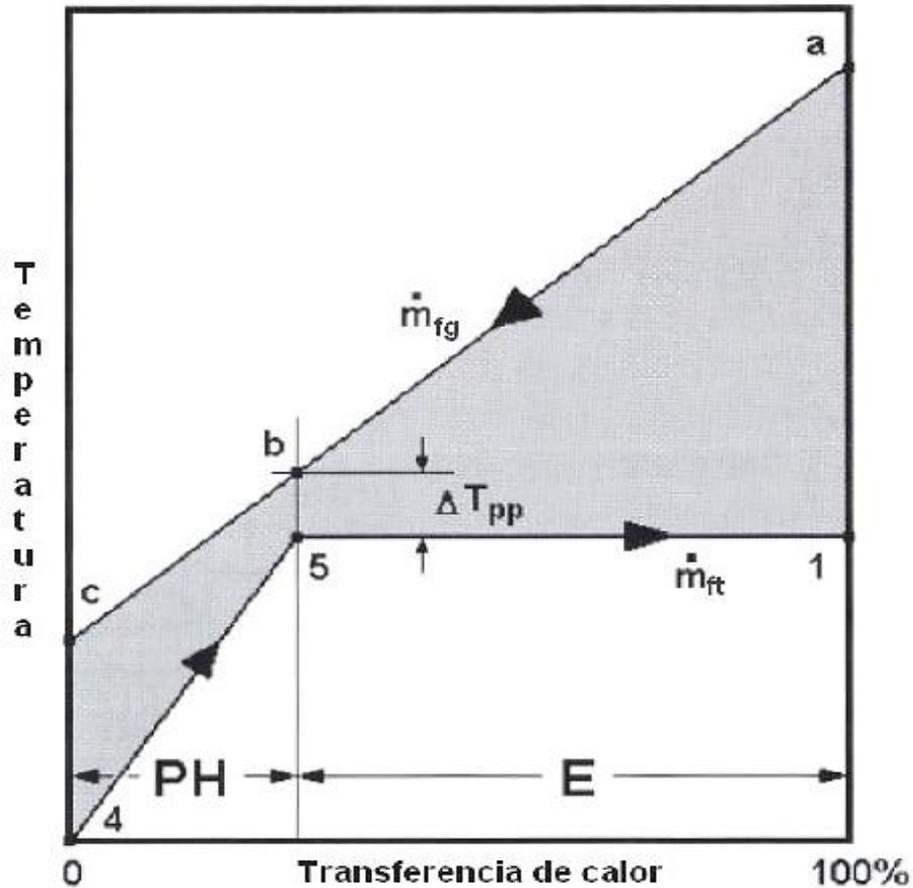


Figura 2.7.- Diagrama Temperatura-Transferencia de calor para el evaporador y el precalentador (DiPippo 2007)

El eje de abscisas representa la cantidad total de calor que pasa del fluido geotérmico al fluido de trabajo, expresada en porcentaje. El eje de ordenadas indica la temperatura alcanzada por el fluido geotérmico y de trabajo en el proceso de intercambio de calor. En el precalentador, el fluido de trabajo recibe el calor necesario como para alcanzar su punto de ebullición, el estado 5. La evaporación ocurre de 5 a 1, siguiendo una isoterma cuando se trata de un fluido de trabajo puro. Existe un punto en el diagrama $T-q$ en que la diferencia de temperatura entre el fluido geotérmico y el de trabajo es mínima y se conoce como punto de acercamiento o *pinch point*.

El estado de los puntos 4, 5 y 1 deben ser conocidos según las especificaciones del ciclo: el punto 4 corresponde con la salida de la bomba, y su estado es de líquido comprimido; el estado 5 es de líquido saturado a la presión del evaporador; y el estado 1 es vapor saturado, y las mismas condiciones que la entrada a la turbina. Así, los dos intercambiadores de calor deben ser analizados por separado.

$$\text{Precalentador: } \dot{m}_{fg} \cdot \bar{c}_{fg} \cdot (T_b - T_c) = \dot{m}_{ft} \cdot (h_5 - h_4) \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$\text{Evaporador: } \dot{m}_{fg} \cdot \bar{c}_{fg} \cdot (T_a - T_b) = \dot{m}_{ft} \cdot (h_1 - h_5) \quad (\text{Ec.2.9})$$

Para este caso se propuso el acercamiento o el pinchpoint de 5°C lo cual es común en los intercambiadores de calor para las plantas de ciclo binario convencionales y en un buen estado. EL valor de la entrada del fluido geotérmico también es dato. Más adelante se calculará el área necesaria para la transferencia de calor del intercambiador.

Análisis global de ciclo

La expresión del rendimiento térmico del ciclo binario es:

$$\eta_{th} = \frac{W_{neto}}{\dot{Q}_{Prec/Evap}} \quad (\text{Ec.2.10})$$

Dado que la potencia neta del ciclo es la diferencia entre la potencia térmica de entrada y la potencia térmica de salida, la fórmula se puede escribir de la siguiente manera:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_{\frac{Prec}{Evap}}} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} \quad (\text{Ec.2.11})$$

Estas fórmulas son aplicables al ciclo, no a la planta. Si la potencia neta se utiliza para suministrar necesidades de potencia auxiliares como las bombas de extracción, ventiladores de las torres de refrigeración, iluminación, etc. (usos propios), todas esas cargas deben ser sustraídas de la potencia neta del ciclo, para obtener la potencia neta de la planta.

Selección del fluido de trabajo

La selección del fluido de trabajo es una decisión muy importante en la fase de diseño, ya que tiene mucha influencia en el posterior funcionamiento de la planta binaria. Se deben tener en cuenta las propiedades termodinámicas de los fluidos, así como otras consideraciones de seguridad, salud e impacto ambiental. Para el caso este caso de estudio se eligió utilizar isopentano el cual es el fluido que más se ocupa en las plantas de ciclo binario y el que ocuparon las plantas instaladas en México.

La siguiente tabla muestra algunos de los fluidos que se ocupan regularmente como fluidos de trabajo en el cual se incluye el agua pura como propuesta y punto de comparación.

Tabla 2.2.- Propiedades termodinámicas de algunos fluidos de trabajo para plantas de ciclo binario (DiPippo, 2007)

Fluido	Fórmula	Tc (°C)	Pc (MPa)	Pc@300K (MPa)	Ps@400K (MPa)
Propano	C ₃ H ₈	96.95	4.236	0.9935	-
i-Butano	i-C ₄ H ₁₀	135.92	3.685	0.3727	3.204
n-Butano	C ₄ H ₁₀	150.8	3.718	0.2559	2.488
i-Pentano	i-C ₅ H ₁₂	187.8	3.409	0.09759	1.238
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	193.9	3.240	0.07376	1.036
Amoníaco	NH ₃	133.65	11.627	1.061	10.3
Agua	H ₂ O	374.14	22.089	0.003536	0.24559

Claramente, todos los fluidos de trabajo que se ocupan en las plantas de ciclo binario convencionales tienen temperaturas críticas y presiones por debajo que el agua.

También hay que considerar las propiedades medioambientales, de salud y seguridad de los potenciales fluidos de trabajo, a la hora de escoger el más apropiado para una planta de ciclo binario. Estas propiedades incluyen inflamabilidad, toxicidad, potencial de destrucción de ozono (ODP) y potencial de calentamiento global (GWP). La tabla siguiente resume estas propiedades para algunos fluidos de trabajo. En la comparación también se incluyen dos clorofluorocarbonos, el R-12 y el R-114, que eran usados hace algunos años. Sin embargo, debido a sus elevados ODP y GWP, ambos han sido prohibidos. Todos los hidrocarburos candidatos a ser utilizados como fluidos de trabajo son obviamente inflamables, y necesitan la instalación de equipos adecuados de protección contra incendios. El ODP está normalizado en 1.0 para los refrigerantes R-11 y R-12 que son los peores en este aspecto. El GWP está normalizado en 1.0 para el dióxido de carbono.

Tabla 2.3.- Propiedades medioambientales, seguridad y salud de algunos fluidos de trabajo para plantas de ciclo binario (DiPippo, 2007).

Fluido	Fórmula	Toxicidad	Inflamabilidad	ODP	GWP
R-12	CCl ₂ F ₂	No tóxico	No inflamable	1.0	4500
R-114	C ₂ Cl ₂ F ₄	No tóxico	No inflamable	0.7	5850
Propano	C ₃ H ₈	Baja	Muy alta	0	3
i-Butano	i-C ₄ H ₁₀	Baja	Muy alta	0	3
n-Butano	C ₄ H ₁₀	Baja	Muy alta	0	3
i-Pentano	i-C ₅ H ₁₂	Baja	Muy alta	0	3
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	Baja	Muy alta	0	3
Amoníaco	NH ₃	Tóxico	Baja	0	3
Agua	H ₂ O	No Tóxico	No inflamable	0	-

Como se observa en la tabla 2.3, todos los fluidos de trabajo que se ocupan en las plantas de ciclo binario convencional tienen un impacto o parámetros negativos para el medio ambiente y la salud, se debe resaltar que el agua podría ser un buen fluido de trabajo ambientalmente si las condiciones termodinámicas lo permiten.

Calculo energético del Ciclo Binario Convencional

El fluido orgánico que es el fluido de trabajo en el Ciclo Binario Convencional CBC, realiza un proceso igual al que en un ciclo Rankine para la generación de energía eléctrica. Para el análisis energético de la planta de CBC se elaboró una hoja de cálculo con la herramienta REFPROP 9.1 de Excel la cual ayudó a definir las propiedades termodinámicas de los fluidos (agua y orgánico) teniendo como base el esquema de la Figura 2.8.

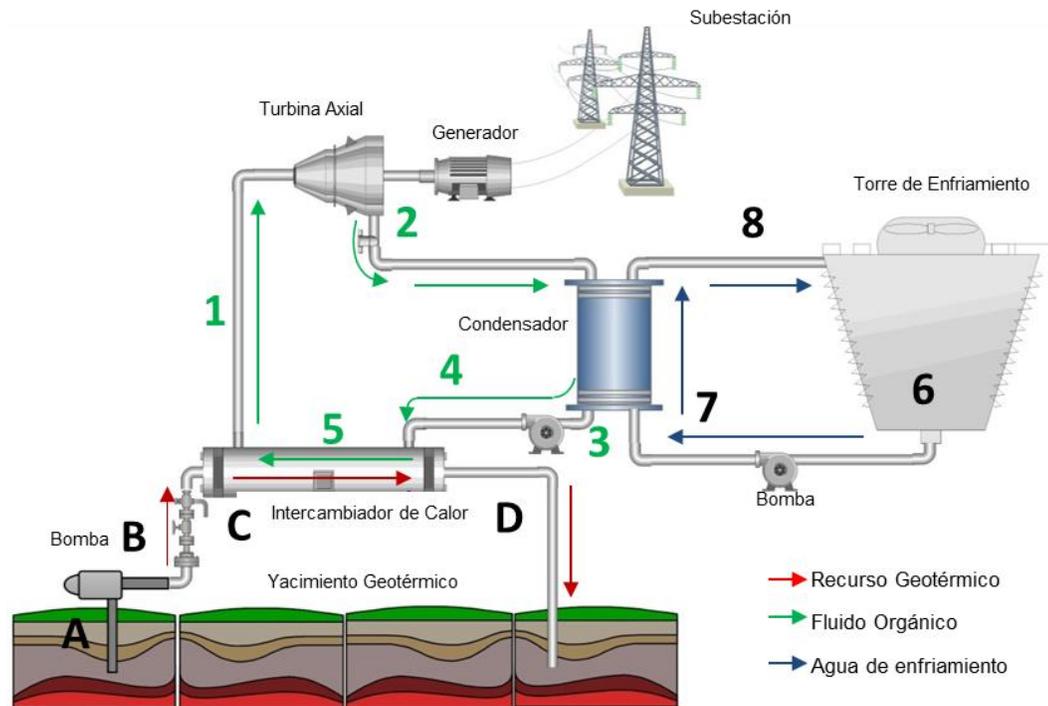


Figura 2.8.- Diagrama de flujos para la hoja de cálculo del ciclo binario convencional.

En la Figura 2.2 se observan el proceso de intercambio de calor en cual tiene dos etapas un precalentador y un evaporador. En el precalentador el fluido de trabajo alcanza su punto de ebullición y entra en el evaporador, del que sale en estado de vapor saturado. El fluido geotérmico se mantiene en todo momento a una presión superior a la de evaporación, correspondiente a su temperatura y a sus características propias del fluido geotérmico (salinidad), para evitar la evaporación o la aparición de gases incondensables que podrían afectar el funcionamiento del intercambiador de calor con la deposición de calcita en las tuberías.

Validación de los cálculos

Para validar los resultados obtenidos en la hoja de cálculo elaborada con la herramienta REFPROP 9.1 en Excel se tomó como referencia a DiPippo (2008). En los casos de estudio presenta una planta de CBC con isopentano como fluido de trabajo, mismos que se usaron para este trabajo.

Se estableció que la potencia neta de los ciclos es de 1200 KW debido a que con esta generación se pudieron validar los resultados obtenidos. En Tabla 4 se establecen los datos de entrada.

En la Tabla 5 se presentan los valores numéricos más importantes, tanto los reportados por DiPippo (2008) como los obtenidos en la hoja de cálculo

Tabla 2.4.- Datos de entrada para la validación de hoja de cálculo

Fluido de trabajo	Isopentano
Temperatura ambiente [°C]	25

Presión atmosférica [Mpa]	0.1
Eficiencia en turbina %	85
Eficiencia en bomba de circulación %	75
Eficiencia en intercambiador de calor %	95
Eficiencia en el condensador %	90
ΔP del intercambiador [MPa]	0.05
Acercamiento en el Intercambiador [°C]	5

En la Tabla 5 se presentan los valores numéricos más importantes, tanto los reportados por DiPippo (2008) como los obtenidos en la hoja de cálculo

Tabla 2. 5.- Comparación entre la hoja de cálculo y los datos reportados por DiPippo (2008)

Parámetros comparativos	DiPippo 2008	Tesis
Potencia Neta [kW]	1200	1200
Temperatura de entrada del fluido geotérmico [°C]	166.85	166.85
Gasto del fluido geotérmico [kg/s]	96.20	98.46
Temperatura de rechazo del fluido Geotérmico [°C]	147.15	147.38
Presión de entrada a la turbina [MPa]	2	2
Temperatura de condensación [°C]	46.85	46.83
Gasto del fluido de trabajo [kg/s]	16.30	16.85
Rendimiento térmico %	15.10	14.9
Eficiencia por segunda ley %	11.30	11.03

En la ANEXO 1 se muestra los datos completos de la hoja de cálculo para la validación de resultados, en donde se maneja que las celdas que están sombreadas son datos

2.1.3.- Ciclo Binario Modificado “PWG”

Uno de los inconvenientes que presenta el ciclo binario tradicional (**ver capítulo 2.1.1**) es que el evaporador y el precalentador, al estar en contacto directo con el agua geotérmica, sufren de severos problemas de corrosión e incrustación, por lo que tienen que ser sometidos a mantenimientos constantes que resultan complicados y costosos. Aunado a esto, la eficiencia de tales equipos es baja; y si se desea un mayor acercamiento entre las temperaturas de los fluidos contenidos en ellos, el tamaño de las unidades debe ser mucho mayor.

Para evitar dichos problemas, el proyecto IMPULSAIV del Instituto de Ingeniería de la UNAM propuso el uso de un sistema binario modificado siendo este un híbrido entre un ciclo binario y un ciclo a condensación con un flasheo, en el cual se sustituya al evaporador y al calentador por un intercambiador de calor de placas, añadiendo una válvula de estrangulamiento (placa orificio) y un separador de flujos centrífugo. De esta manera, sólo el intercambiador de placas entrará en contacto con el fluido geotérmico. Otra propuesta que se hace en este ciclo modificado o híbrido, es utilizar agua como fluido de trabajo. Adicionalmente y por necesidades del ciclo propuesto, se propone el uso de una turbina de alta velocidad para cumplir con las características del ciclo de generación (Aviña, Ramos y Hernández 2012).

En tal sistema, ver figura 2.10, el agua geotérmica caliente al fluido de trabajo (el cual puede ser un refrigerante o agua previamente tratados), a través del intercambiador de calor de placas, hasta llevarlo a la condición de líquido saturado. Posteriormente, el fluido de trabajo se hace pasar a través de la placa orificio, donde disminuye su energía de presión y, como consecuencia, parte de él evapora. La mezcla bifásica generada (vapor-líquido) se conduce a un separador de fases centrífugo. El vapor separado se dirige hacia

La turbina donde se realiza el trabajo y el líquido se reintegra al ciclo. A continuación, el vapor es condensado y se bombea hasta alcanzar la presión del separador y se mezcla con el líquido en un dispositivo llamado colector, para finalmente ser bombeado a la presión del intercambiador de placas, donde se cierra el ciclo.

A pesar de parecer un sistema más aparatoso por la cantidad de equipos utilizados, los elementos complementarios son sencillos en su caracterización y mantenimiento.

Ventajas del Ciclo PWG vs. Ciclo Binario Convencional

La principal ventaja que presenta el sistema PWG sobre una planta de ciclo binario convencional es que, al emplear un intercambiador de calor de placas, la eficiencia en la generación de vapor se incrementa, ya que este tipo de equipos permiten acercamientos de hasta 1°C entre los fluidos; sus pérdidas son bajas, lo cual es sumamente importante en el aprovechamiento de la energía geotérmica, el espacio ocupado por estos intercambiadores es menor y su mantenimiento es más sencillo, comparado con los de carcasa y tubos.

En la figura 2.11 se muestran ambos intercambiadores: puede observarse que el área de intercambio en el de placas es extensa, en comparación con el de tubo y coraza. Si se deseara incrementar el área de un intercambiador de placas, bastaría con agregar más láminas, sin necesidad de comprar un nuevo equipo, lo cual resulta más complicado en un equipo tubular.

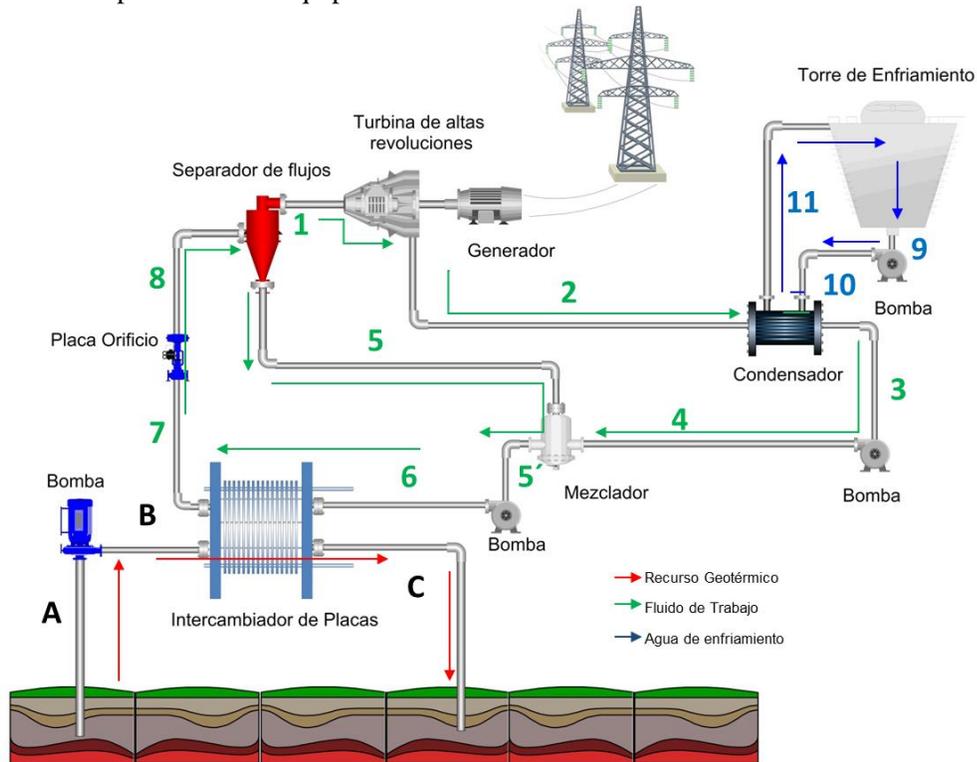


Figura 2. 9.- Diagrama del ciclo PWG

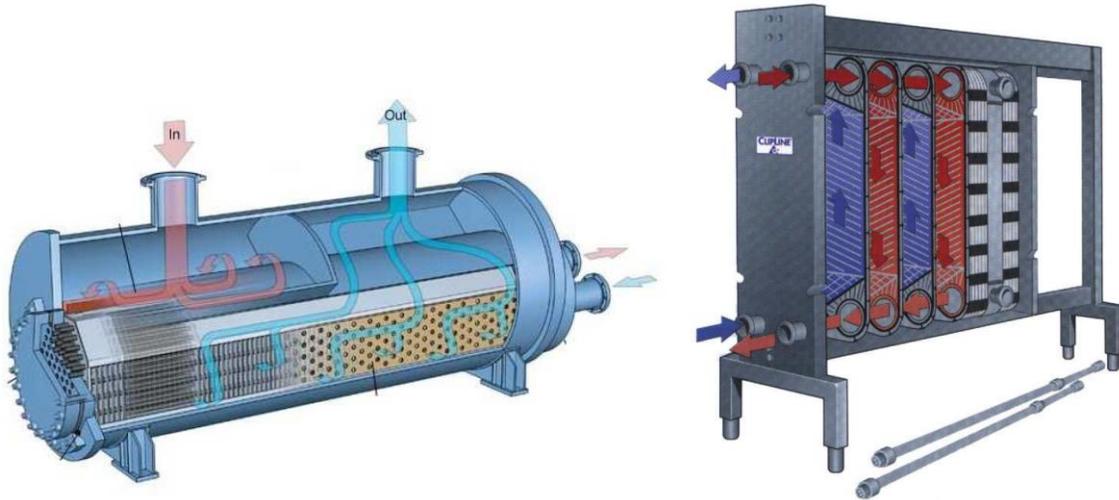


Figura 2. 10.- Intercambiadores de calor

El acercamiento de temperaturas logrado por ambos intercambiadores se puede observar en la figura 2.12. En uno de placas, figura 2.12-A, el fluido frío puede alcanzar una temperatura mayor que la de salida del fluido caliente (Alfa Laval 2007), lo cual no sería posible con un intercambiador de carcasa y tubos, figura 2.12-B.

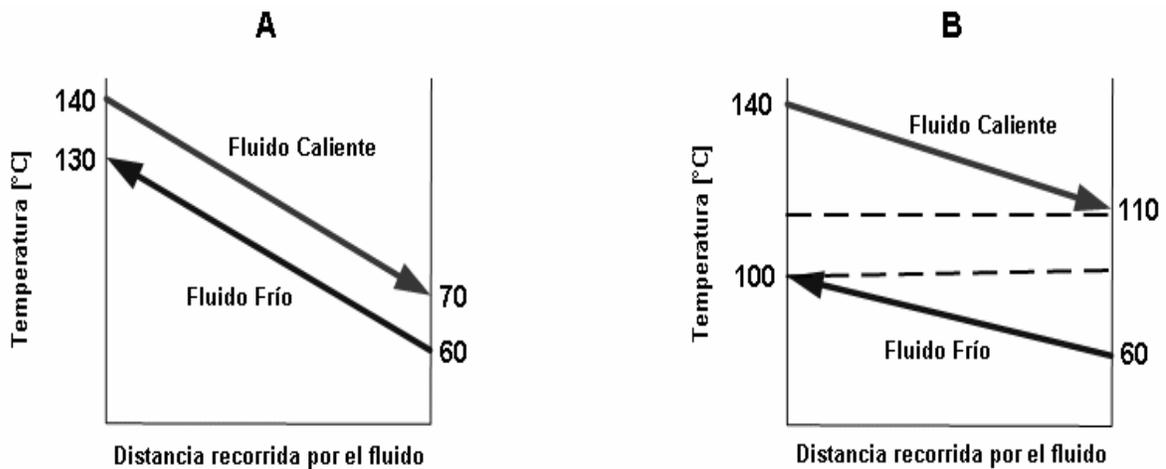


Figura 2. 11.- Acercamiento de temperaturas dentro de (A) Intercambiador de placas, y (B) Intercambiador de carcasa y tubos

En este nuevo sistema con evaporación *flash*, y con la intención de reducir el espacio total de la planta, se considera el uso de una turbina de alta velocidad. Este tipo de turbina se seleccionó debido a las características del vapor que se tendrán en este ciclo. El separador de vapor empleado es centrífugo, ya que con él se logra una separación de, incluso, el 99.9% del líquido (A. Aceves 1984) .

El sistema desarrollado, posee diferencias significativas con respecto a los sistemas convencionales de generación con geotermia de baja entalpía (ciclo binario) y, más interesante aún, presenta ventajas sobre éste, entre las que se pueden mencionar:

- Períodos de mantenimiento muy cortos, lo que significa mayor disponibilidad de los equipos.

- Mayor aprovechamiento de la energía disponible, que se traduce en mayor extracción de energía de una fuente.
- El espacio que necesita para su instalación es relativamente menor con respecto a los ciclos binarios convencionales.
- El utilizar agua como fluido de trabajo presenta ventajas medioambientales y de salud en su funcionamiento (ver tabla 2.3)
- Desarrollo de tecnología e investigación mexicana.

El análisis energético se presenta de acuerdo a los principios básicos termodinámicos de balance de masa y energía.

Para entender de manera más clara los procesos termodinámicos que ocurren en el ciclo PWG se presenta el diagrama de proceso T-S (Temperatura vs Entropía) figura 2.13.

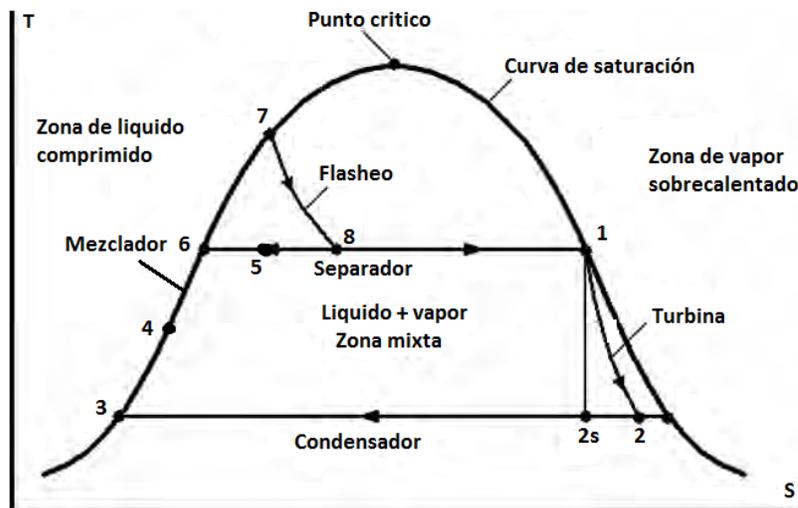


Figura 2. 12.- Diagrama temperatura vs entropía del ciclo PWG

A continuación se presentan las consideraciones y ecuaciones para el cálculo energético del ciclo PWG. Al igual que para el ciclo binario se dividieron los componentes para su mejor análisis, la turbina, el condensador y las bombas se calcularán igual que para el ciclo binario (ver capítulo 2.1.1) y el intercambiador de calor se calcula igual que el precalentador del ciclo binario.

Proceso de flasheo o evaporación instantánea

Al igual que en las plantas de geotérmicas convencionales donde se tiene una planta a condensación, para ayudar a realizar el flasheo se manipulan las presiones por medio de válvulas o placas orificio. El proceso se inicia con el fluido de trabajo después de recibir la energía térmico del fluido geotérmico en el estado 7 (ver figura 2.10 y 2.13) la cual viene presurizada. El proceso que se lleva a cabo en la placa orificio se calcula como proceso isoentálpico, ya que se produce de manera constante y espontánea, esencialmente adiabática y sin la implicación de algún tipo de trabajo (DiPippo, 2007) . Se descarta cualquier cambio en la energía cinética o potencial del fluido a medida que experimenta el flasheo, por lo que se puede escribir que:

$$h_7 = h_8 \quad (\text{Ec. 2.12})$$

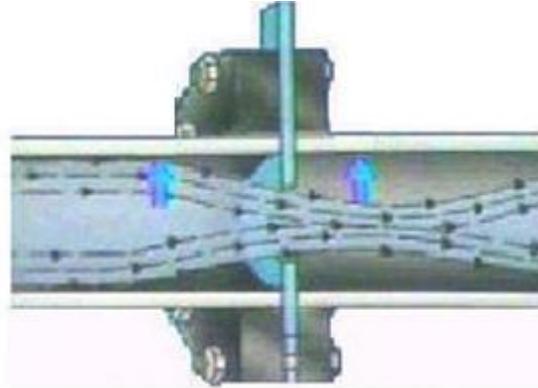


Figura 2. 13.- Ilustración del proceso en una placa orificio

Separador de flujos

La mezcla proveniente de la placa orificio entra al separador el cual nos entrega líquido y vapor saturado. El proceso de separación se calcula a presión constante (isobárico). La calidad o fracción de vapor “x” de la mezcla después del flasheo, estado 1, se puede encontrar con la siguiente relación:

$$X_1 = \frac{h_8 - h_5}{h_1 - h_5} \quad (\text{Ec.2.13})$$

Con esta ecuación podemos encontrar el porcentaje de vapor que entra a la turbina.



Figura 2. 14.- Separador de flujos centrífugo

Comparativa de rendimiento energético de los ciclos

Para realizar la comparativa de rendimiento energético, se establecieron los valores de entrada que se encuentran en la Tabla 2.6. Cabe mencionar que la potencia neta propuesta es de 1200 [kW] y la temperatura de entrada del fluido geotérmico es de 140 [°C].

En la Tabla 2.6 se establecen algunas diferencias entre el Ciclo Binario Convencional CBC y el Ciclo Binario Modificado CBM (PWG), ya que el intercambiador de calor tiene diferente punto mínimo de acercamiento (pinch), para el CBC es de 5 [°C] mientras que para el CBM es de 3[°C] aunque teóricamente podría llegar a 1 °C, otra diferencia es que el CBC tiene una presión de entrada a la turbina de 1 [MPa] y el ciclo PWG tiene una presión de entrada de 0.1 [MPa] lo que repercute en el condensador y el gasto del agua de enfriamiento, esto debido al fluido de trabajo de cada uno de los ciclos y al dato de entrada de temperatura del fluido geotérmico.

Tabla 2.6.- Datos de entrada para realizar la comparativa de rendimiento energético

Fluido de trabajo	Isopentano-Agua
Temperatura ambiente [°C]	25
Presión atmosférica [Mpa]	0.1
Eficiencia en turbina %	85
Eficiencia en bomba de circulación %	75
Eficiencia en intercambiador de calor %	95
Eficiencia en el condensador %	90
ΔP del intercambiador [MPa]	0.05
Acercamiento en el Intercambiador [°C]	5-3
Temperatura agua de enfriamiento [°C]	25
Temperatura de condensación [°C]	47

Con estos datos se obtuvo la tabla de datos teóricos comparativos entre los ciclos Binario y PWG. En la Tabla 2.7 se muestran los datos puntuales comparativos del rendimiento energético para el caso específico de 1200 kW de salida de potencia, y de acuerdo a los resultados arrojados por la hoja de cálculo el CBM (PWG) se encuentra dentro de un rango de rendimiento aceptable .

Tabla 2.7.- Comparación teórica energética entre CBC y el CBM (PWG) para 1200 [kWe]

Ciclo	CBC	CBM (PWG)
Fluido de trabajo	Isopentano	Agua
Temperatura del fluido geotérmico [°C]	140	140
Gasto del fluido geotérmico [kg/s]	77.72	64.90
Gasto del fluido de trabajo [kg/s]	23.80	65.03
Usos Propios [%]	2.58	3.12
Gasto de agua de enfriamiento [kg/s]	229.25	233.10
Rendimiento Térmico [%]	11.79	13.04
Eficiencia del ciclo 2° ley [%]	20.54	24.59

En el ANEXO 2, se muestra los datos completos de la hoja de cálculo para el análisis energético y comparativo de resultados entre el CBM (PWG) y el CBC, en donde se maneja que las celdas que están sombreadas son datos

Para visualizar mejor la comparativa energética se elaboraron gráficas comparativas de los parámetros más importantes.

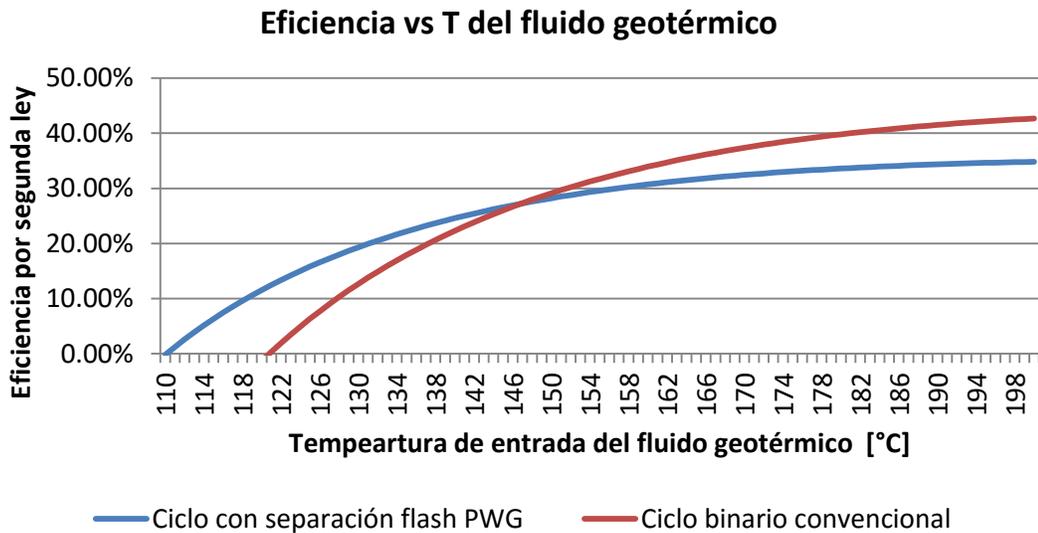


Figura 2.15.- Comparación entre el CBC y el CBM (PWG) variando la temperatura de entrada del fluido geotérmico contra la eficiencia del ciclo.

En la figura 2.17 se muestra la variación de la eficiencia si se modifica la temperatura de entrada del fluido geotérmico. Esta gráfica ayuda a definir el rango de operación óptima para cada uno de los ciclos, en la cual si se tiene recurso geotérmico por debajo de los 146 °C la opción más eficiente sería usar un CBM (PWG) y si se tiene mayor temperatura del recurso geotérmico lo recomendable es usar un CBC.

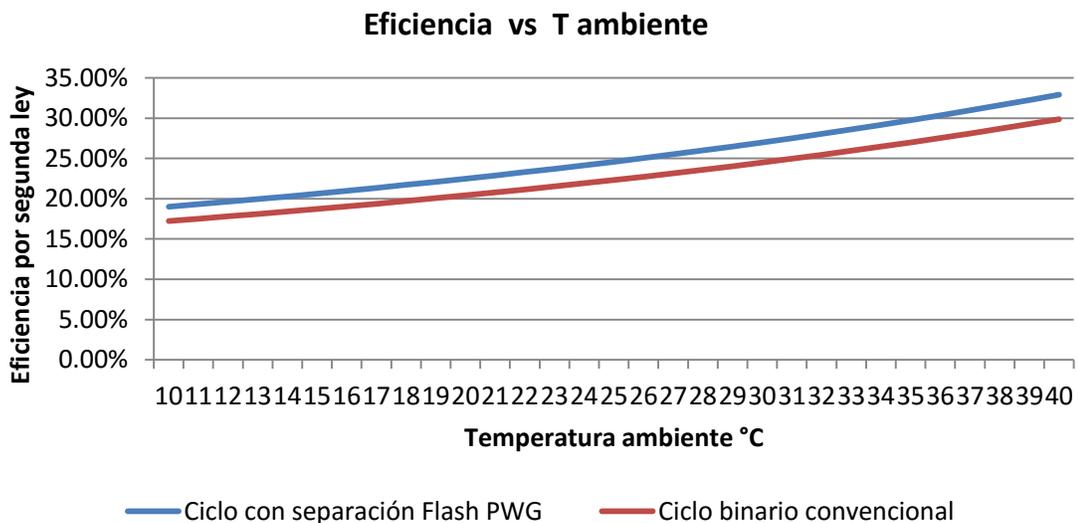


Figura 2.16.- Comparativa del CBC y el CBM (PWG) variando la temperatura ambiente contra la eficiencia del ciclo.

En la figura 2.18 se muestra la comparativa de los ciclos variando la temperatura ambiente, lo cual afecta de igual manera la eficiencia en ambos ciclos tomado en cuenta la potencia es fija. Esta evaluación se realizó con una temperatura del fluido geotérmico igual a 140 °C, por lo cual el CBM (PWG) tiene una mejor eficiencia.

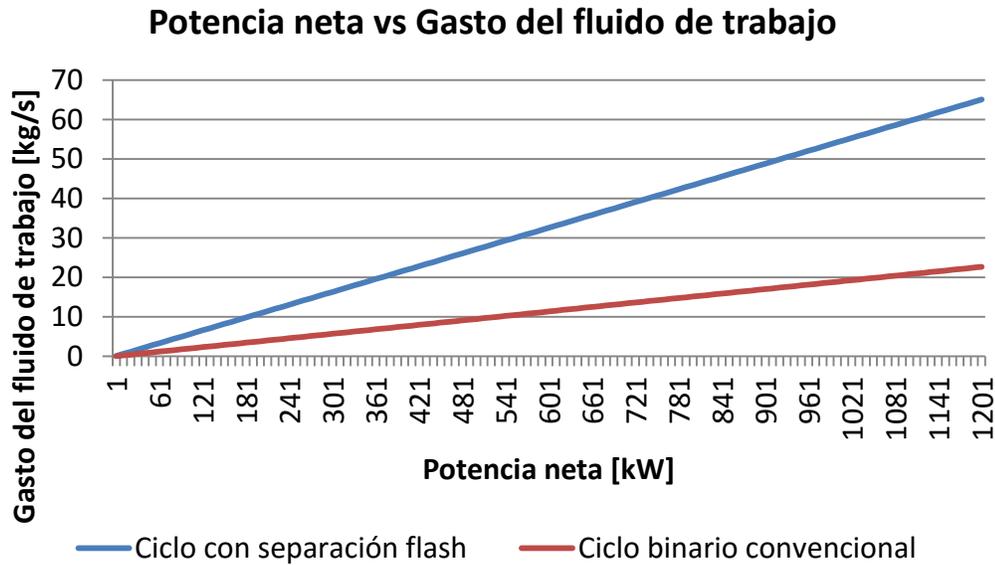


Figura 2.17.- Comparativa del CBC y el CBM (PWG) variando la potencia neta contra el gasto del fluido de trabajo necesario.

La figura 2.19 muestra que la masa del fluido de trabajo en el CBM es mucho mayor al CBC, cabe resaltar que el fluido de trabajo en el CBM es agua y en el CBC es isopentano, el cual se debe tratar con precaución para experimentación y no son de fácil acceso como el agua.

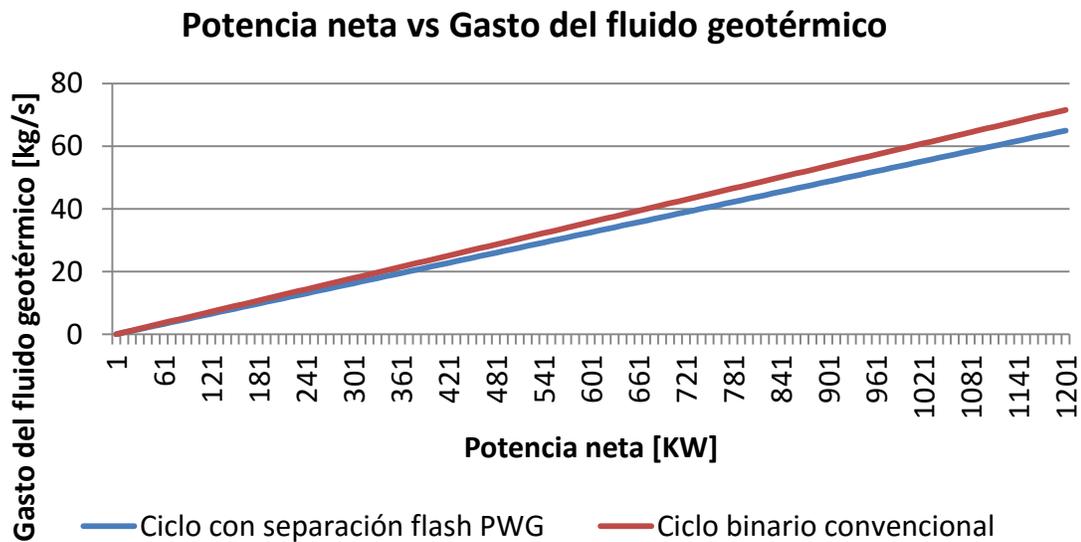


Figura 2.18.- Comparativa del CBC y el CBM (PWG) variando la potencia neta contra el gasto de fluido geotérmico necesario.

En la figura 2.20 se muestra que el CBM (PWG) tiene un mejor rendimiento en cuanto a la masa del fluido geotérmico. Aunque no se presenta mucha diferencia con el CBC, esto puede ser un factor importante al elegir el ciclo a usar, una vez que ya está definido el recurso geotérmico en un yacimiento somero.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que cuando se tienen temperaturas menores a los 140°C de recurso geotérmico, teniendo como temperatura ambiente 25°C, el CBM (PWG) presenta un mejor rendimiento que el CBC. Esto puede abrir nuevas áreas de oportunidad para la generación eléctrica con baja entalpía, no solo con geotermia sino que también con otras fuentes renovables.

2.1.3.- Sistema MED

Fundamentos, componentes principales y configuraciones del sistema MED

En el proceso MED, (por sus siglas en inglés), se tiene una serie de efectos de evaporación con presiones consecutivas decrecientes que producen agua destilada. Las presiones vacuométricas escalonadas se deben a que el agua se evapora a temperaturas más bajas conforme la presión disminuye.

El primer efecto sirve como medio de calentamiento para el segundo efecto, y así sucesivamente. Mientras más efectos, mayor será el rendimiento. En la Figura 2.21 se muestran un proceso MED con tres efectos. La presión del efecto 1 es superior a la del efecto 2, y del mismo modo, la presión del efecto 2 es más alta que la del efecto 3 (las presiones son de vacío). La fuente de calor en el efecto 1 es suficiente para evaporar una parte del agua de alimentación que está entrando por la parte superior de la unidad. El vapor formado en este efecto calienta el siguiente efecto que está a menor presión. El proceso de producir vapor en cada efecto, se aprovecha para calentar el siguiente efecto, y así continúa a través de todos los efectos hasta que el vapor del último efecto se condensa en la etapa final. El concentrado de cada efecto puede ser enviado al siguiente efecto o puede ser sacado en puntos específicos en el proceso. El destilado, agua dulce, se obtiene de la condensación del vapor en cada efecto y del condensador principal (Acwasasakura, 2010).

El proceso MED implica una serie de evaporadores donde es muy común encontrar arreglos de intercambiadores de calor de coraza y tubos, donde el vapor es condensado dentro de los tubos y el agua de mar se distribuye en la superficie exterior. El vapor producido en una etapa se usa para calentar la siguiente etapa. Cada evaporador (llamado efecto) mantiene una presión y temperatura decreciente. Por lo general se emplea vapor de baja presión (menor a 0.35 bar) como fuente energética para el primer efecto.

La producción de destilado de estos procesos está entre 500 a 15,000 m³/día (menor que la de MSF), se dimensionan de 4 a 12 efectos o cámaras de evaporación que trabajan con un rango de temperaturas de 55 a 70 °C, obteniendo calidades iguales a las MSF (Mezher et al, 2010).

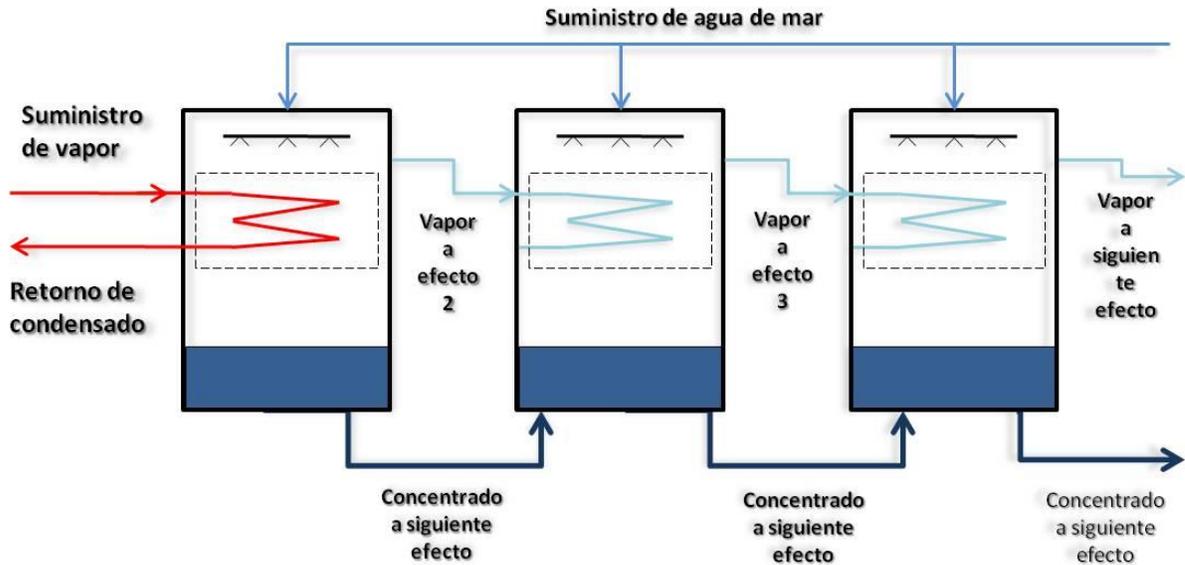


Figura 2.19.- Proceso de desalación MED

El proceso es mucho más robusto; sin embargo es más rentable ya que no requiere de partes móviles a excepción de las bombas de vacío. La operación se realiza a bajas temperaturas por lo que se ven reducidos los problemas de corrosión e incrustación, además que las diferencias de presiones son mucho menores. Se pueden emplear diferentes fuentes de calor, como agua caliente, vapor de baja o alta presión. Es ideal para acoplarse a centrales de generación, ya que su consumo eléctrico es bajo, así como el consumo en químicos. Es de respuesta rápida y muy flexible.

Análisis energético

Los procesos de destilación térmica tienen un principio de funcionamiento muy similar ya sean de tipo MED, MSF o VC, así como también los subsistemas que los componen

Balace de masa y energía del proceso

El proceso de desalación se basa en la separación del agua de las sales disueltas a través de la generación de vapor. Para obtener que el vapor se genere, han de emplearse dos métodos: 1) el suministro de energía térmica y 2) la disminución súbita de la presión (vapor flash). En el caso de la tecnología MED, el agua de mar se inyecta en cámaras vacuométricas donde existe un serpentín que proporciona el calor necesario para la evaporación. Debido a las presiones vacuométricas la temperatura de ebullición del agua disminuye, generando, prácticamente, vapor puro, siendo su concentración menor a 10 [ppm]. Este vapor se extrae y se condensa, obteniéndose así agua líquida desalada llamada destilado. Las sales se quedan en la fase líquida, aumentando la concentración de ésta, a la que se le conoce como salmuera. Una vez separadas, el destilado se envía a la etapa de postratamiento para obtener la calidad del agua que se requiera.

Propiedades del agua de mar

Como se mencionó, las propiedades del agua de mar empleada permitirán dimensionar de manera óptima la obtención del rendimiento adecuado.

Las propiedades dependen de tres factores en particular: la salinidad, temperatura y presión, aunque la variación de las propiedades con respecto de la presión suele despreciarse.

Balances de masa y factor de concentración

En los procesos térmicos de destilado, el agua de mar entra a cámaras de vacío donde, por las propiedades del agua, éste se expande generando una mezcla bifásica de vapor/agua salina. Esto se hace con el fin de que el vapor obtenido contenga un mínimo de sales y concentrados para después condensarlo y obtener el agua producto.

Como análisis preliminar, se realizan los balances de masa tanto del agua como de las sales (conservación de masa). Esto es:

$$\dot{m}_{mu} = \dot{m}_d + \dot{m}_{bd} \dots \dots \dots \text{(Ec. 2.12)}$$

Dónde:

\dot{m}_{mu} = Gasto másico de agua de la unidad desaladora (proceso)

\dot{m}_d = Gasto másico de agua destilada

\dot{m}_{bd} = Gasto másico de agua de rechazo o salmuera

Para el balance de concentraciones se tiene que:

$$S_{mu}\dot{m}_{mu} = S_d\dot{m}_d + S_{bd}\dot{m}_{bd} \dots \dots \dots \text{(Ec. 2.13)}$$

Donde:

S_{mu} = Salinidad que contiene el agua para el proceso

S_d = Salinidad que contiene el agua destilada

S_{bd} = Salinidad que contiene el agua de rechazo o salmuera

De la ecuación de balance de concentrados, se obtiene un parámetro importante para los sistemas de desalación que es el Factor de Concentración (CF), definido como la relación de salinidad entre el concentrado y el agua para proceso:

$$CF = \frac{S_{bd}}{S_{mu}} \dots \dots \dots \text{(Ec. 2.14)}$$

Si consideramos que la salinidad del destilado es cero ($S_d \approx 0$), el Factor de Concentración se puede definir como:

$$CF = \frac{\dot{m}_{mu}}{\dot{m}_{bd}} = \frac{\dot{m}_{mu}}{\dot{m}_{mu} - \dot{m}_d} \dots \dots \dots \text{(Ec. 2.15)}$$

Para procesos con bajo CF, se requieren grandes consumos de agua de mar lo que conlleva a grandes consumos de químicos, sin embargo, si se tiene salinidades menores, los problemas de incrustación y de energía desaprovechada se ven reducidos. Para altos valores de CF, se tiene lo contrario, se requiere menor volumen de agua para el proceso y con esto se reduce la cantidad de químicos necesarios para el tratamiento, sin embargo, los concentrados tienen una mayor salinidad, lo que provoca mayores pérdidas térmicas y un mayor potencial de corrosión. Los CF típicos en plantas operativas son de 1.3 a 1.5.

Otro parámetro es el suministro de agua de alimentación específico (SFWS) que es la relación entre la cantidad de agua para proceso entre la cantidad de agua destilada. También puede escribirse este valor en función del CF.

$$SFWS = \frac{\dot{m}_{mu}}{\dot{m}_d} = \frac{CF}{CF-1} \dots \dots \dots \text{(Ec. 2.16)}$$

Por lo general se tiene valores del SFWS de 3 a 4.

Eficiencia térmica

Para conocer el rendimiento de los sistemas de desalación, se emplea el parámetro GOR (Relación de ganancia a la salida) que es la relación entre la cantidad de agua destilada por la cantidad de masa de vapor empleada:

$$\text{GOR} = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_{\text{vapor}}} \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.17})$$

Análisis de un sistema MED en paralelo

El análisis térmico del sistema de desalación tipo MED en paralelo se realizó tomando como base la información obtenidos por integrantes del Proyecto IMPULSA IV del Instituto de Ingeniería, en una visita realizada a la Central Termoeléctrica Presidente Adolfo López Mateos, en Tuxpan, Veracruz; en donde se cuenta con 4 unidades de desalación tipo MED.



Figura 2.20.- Planta desaladora tipo MED Tuxpan Veracruz

Los componentes principales de la unidad MED son las cuatro cámaras de evaporación, un precalentador de agua de mar, el sistema de generación de vacío por medio de eyectores, el vapor que se extrae de la turbina y las bombas para mover el agua de mar, destilado y salmuera.

El proceso de desalación inicia por medio de una bomba que aumenta la presión del agua de mar, la cual entra en un intercambiador de calor con la finalidad de condensar el vapor generado en la última cámara y al mismo tiempo precalentar el agua de entrada. En seguida, parte del flujo inicial es rechazado y lo que se conserva es dividido entre el número de cámaras que tiene el sistema. El agua de mar que va a entrar a la cámara uno, es precalentada con el vapor que proviene de los eyectores que generan el vacío, el cual va aumentando desde la primera cámara hasta la última. En las cámaras se tiene una presión vacuométrica, esto ayuda a disminuir la temperatura de saturación del agua, también se tienen en las cámaras un arreglo de tubos por donde fluye el vapor que se generó en el efecto anterior, pero para el caso de la primera cámara, el vapor que paso por los tubos es una extracción de la turbina.

El flujo que entra a la primera cámara es rociado por medio de aspersores sobre el arreglo de tubos que conducen el vapor extraído de la turbina, con esto se logra que parte del agua rociada se evapore al entrar en contacto con los tubos, mientras se condensa el vapor en su interior.

El vapor obtenido en la primera cámara entra al arreglo de tubos de la segunda cámara y sirve como fuente de calor, mientras tanto la salmuera generada en el primer efecto se introduce en este segundo efecto y el proceso realizado en la primera cámara se repite en las siguientes. Una vez que en la última cámara se genera el vapor, parte de éste es extraído por un eyector para usarlo en conjunto con el vapor extraído de la turbina como fuente de calor para la primera cámara, la parte restante pasa al precalentador de agua de mar para condensarse. Los flujos de destilado son recolectados y enviados a un tanque, por otro lado, la salmuera obtenida es descargada al mar.

En la figura 2.23 se muestra el esquema del sistema de desalación MED estudiado.

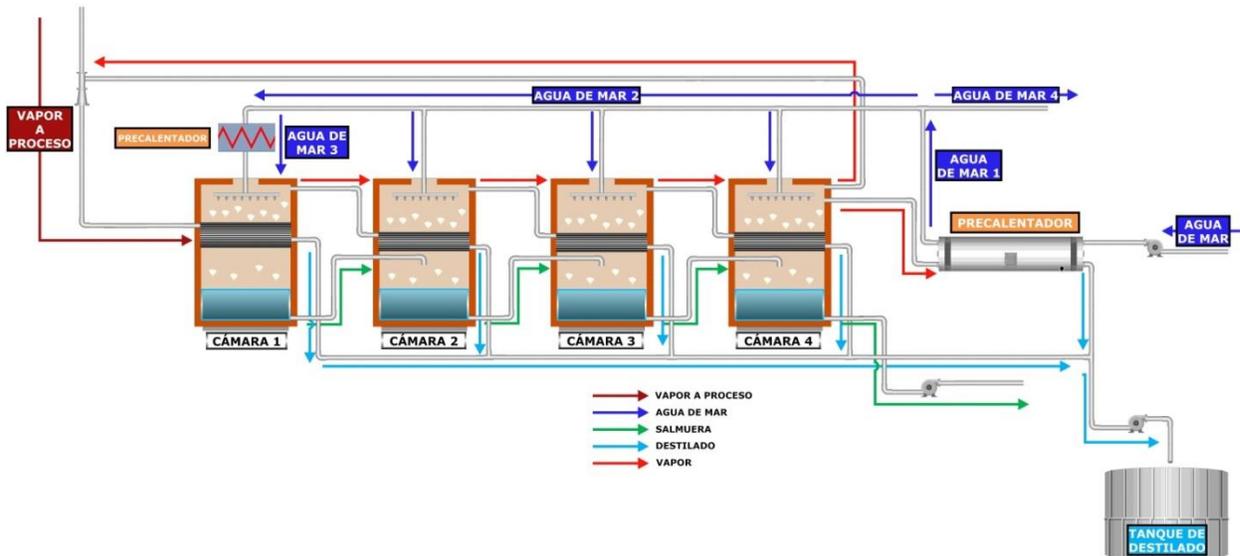
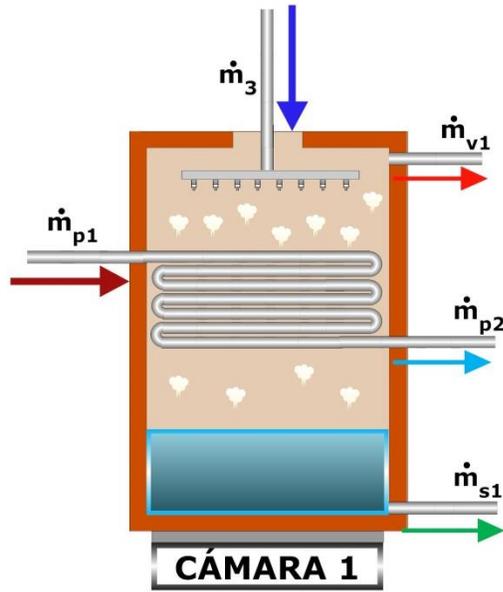


Figura 2. 21 Esquema del sistema MED

Como primera parte del análisis, se realiza un balance de masa y energía en la primera cámara.

Cámara 1



Balance de masa:

$$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_{s1} = \dot{m}_3 \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.18})$$

$$\dot{m}_{p1} = \dot{m}_{p2} \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.19})$$

Balance de energía:

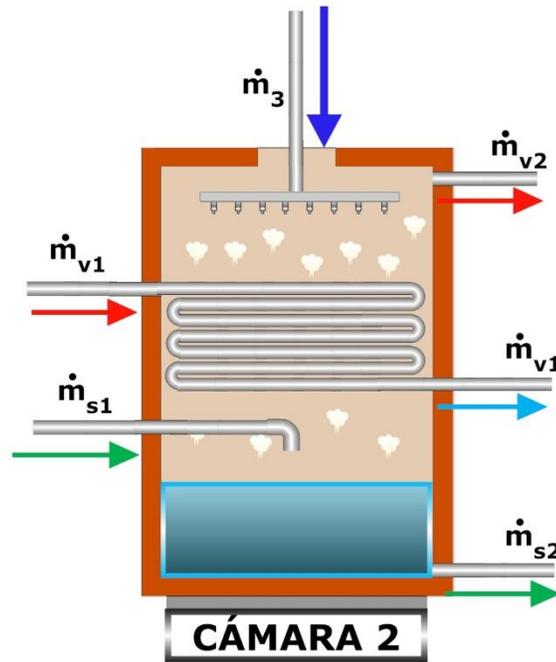
$$\dot{m}_{p1} * h_{p1} + \dot{m}_3 * h_3 = \dot{m}_{v1} * h_{v1} + \dot{m}_{s1} * h_{s1} + \dot{m}_{p2} * h_{p2} \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.20})$$

Dónde:

- \dot{m}_{v1} = Gasto másico de vapor uno
- \dot{m}_{s1} = Gasto másico de salmuera uno
- \dot{m}_3 = Gasto másico de agua de mar por cámara
- \dot{m}_{p1} = Gasto másico de vapor a proceso
- \dot{m}_{p2} = Gasto másico del vapor a proceso condensado
- h_i = Entalpía a las condiciones del fluido correspondiente

Para la segunda cámara, así como la tercera y cuarta, se realiza un análisis similar a la primera pero considerando el flujo de salmuera que entra a la cámara.

Cámara 2



Balance de masa:

$$\dot{m}_{v2} + \dot{m}_{s2} = \dot{m}_3 + \dot{m}_{s1} \dots \dots \dots \text{(Ec. 2.21)}$$

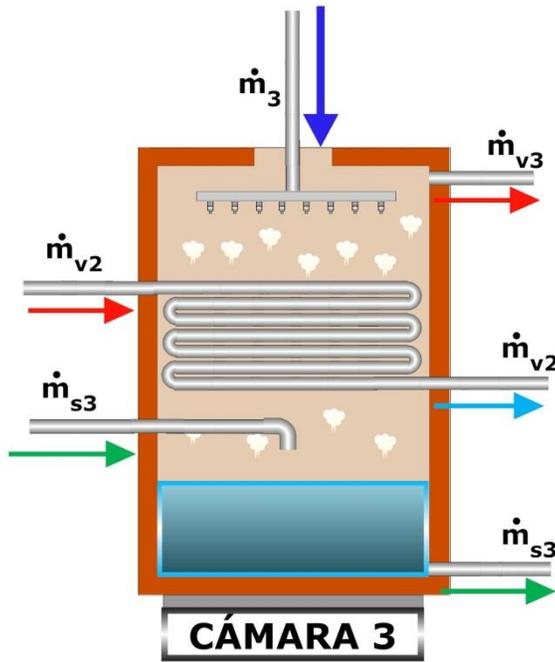
Balance de energía:

$$\dot{m}_3 * h_2 + \dot{m}_{v1} * h_{v1} + \dot{m}_{s1} * h_{s1} = \dot{m}_{v1} * h_{d1} + \dot{m}_{v2} * h_{v2} + \dot{m}_{s2} * h_{s2} \dots \dots \dots \text{(Ec. 2.22)}$$

Dónde:

- \dot{m}_{v1} = Gasto másico de vapor uno
- \dot{m}_{s1} = Gasto másico de salmuera uno
- \dot{m}_{v2} = Gasto másico de vapor dos
- \dot{m}_{s2} = Gasto másico de salmuera dos
- \dot{m}_3 = Gasto másico de agua de mar por cámara
- h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

Cámara 3



Balance de masa:

$$\dot{m}_{v3} + \dot{m}_{s3} = \dot{m}_3 + \dot{m}_{s2} \dots \dots \dots \text{(Ec. 2.23)}$$

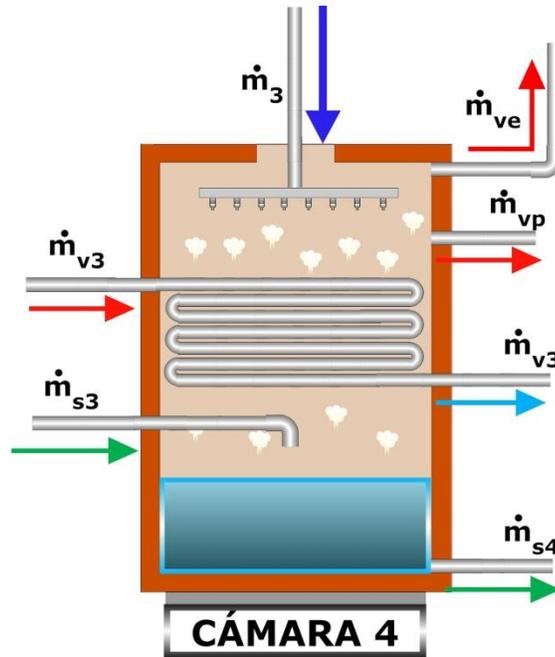
Balance de energía:

$$\dot{m}_3 * h_2 + \dot{m}_{v2} * h_{v2} + \dot{m}_{s2} * h_{s2} = \dot{m}_{v2} * h_{d2} + \dot{m}_{v3} * h_{v3} + \dot{m}_{s3} * h_{s3} \dots \dots \dots \text{(Ec. 2.24)}$$

Dónde:

- \dot{m}_{v2} = Gasto másico de vapor dos
- \dot{m}_{s2} = Gasto másico de salmuera dos
- \dot{m}_{v3} = Gasto másico de vapor tres
- \dot{m}_{s3} = Gasto másico de salmuera tres
- \dot{m}_3 = Gasto másico de agua de mar por cámara
- h_i = Entalpía a las condiciones del fluido correspondiente

Cámara 4



Balance de masa:

$$\dot{m}_{vp} + \dot{m}_{ve} + \dot{m}_{s4} = \dot{m}_3 + \dot{m}_{s3} \dots \dots \dots (Ec. 2.25)$$

$$\dot{m}_{v4} = \dot{m}_{vp} + \dot{m}_{ve} \dots \dots \dots (Ec. 2.26)$$

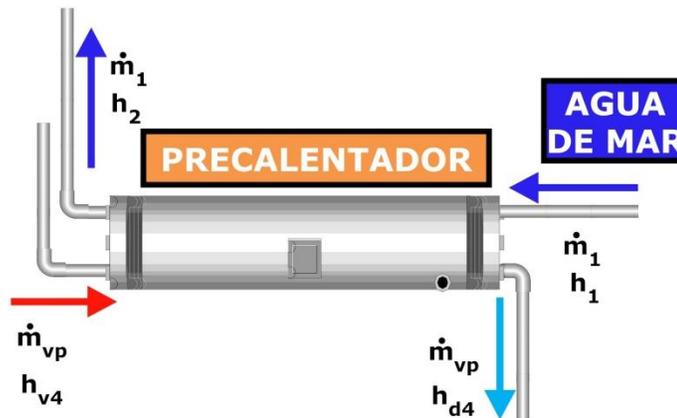
Balance de energía:

$$\dot{m}_3 * h_2 + \dot{m}_{v3} * h_{v3} + \dot{m}_{s3} * h_{s3} = \dot{m}_{v3} * h_{d3} + \dot{m}_{v4} * h_{v4} + \dot{m}_{s4} * h_{s4} \dots \dots \dots (Ec. 2.27)$$

Dónde:

- \dot{m}_{v3} = Gasto másico de vapor tres
- \dot{m}_{s3} = Gasto másico de salmuera tres
- \dot{m}_{v4} = Gasto másico de vapor cuatro
- \dot{m}_{s4} = Gasto másico de salmuera cuatro
- \dot{m}_{ve} = Gasto másico de vapor al eyector
- \dot{m}_{vp} = Gasto másico de vapor al precalentador de agua de mar
- \dot{m}_3 = Gasto másico de agua de mar por cámara
- h_i = Entalpía a las condiciones del fluido correspondiente

Pre calentador de agua de mar



Balance de energía

$$\dot{m}_{vp} * h_{v4} + \dot{m}_1 * h_1 = \dot{m}_{v4} * h_{d4} + \dot{m}_1 * h_2 \dots\dots\dots (Ec. 2.28)$$

Dónde:

- \dot{m}_1 = Gasto másico de agua de mar inicial
- \dot{m}_{vp} = Gasto másico de vapor al precalentador de agua de mar
- h_i = Entalpía a las condiciones del fluido correspondiente

Las consideraciones tomadas para el análisis se enlistan a continuación:

- Para conocer las entalpías del agua de mar en los diferentes puntos del sistema, se tomaron los datos de tablas de vapor considerándola como agua convencional.
- Las cámaras están completamente aisladas térmicamente para evitar transferencia de calor con los alrededores.
- No existen pérdidas del gasto másico en todo el proceso
- Todo el líquido que se evapora en las cámaras es el destilado que se obtiene, excepto en la última cámara, donde parte del vapor es extraído por el eyector.
- Las tuberías que conducen al agua de mar, la salmuera y el vapor están perfectamente aisladas térmicamente para evitar pérdidas de calor.

Los parámetros de funcionamiento de la planta de desalación se obtuvieron del esquema térmico FZD 308090 F1/11, que es parte de la información obtenida por el proyecto IMPULSA IV y son los siguientes:

- Presión del agua de mar antes de la bomba: 1.01 [bar]
- Presión del agua de mar después de la bomba: 3 [bar]
- Temperatura del agua de mar a la entrada del intercambiador: 35 [°C]
- Presión del agua de mar a la entrada de las cámaras: 1.45 [bar]

A continuación se presenta una tabla comparativa entre los resultados obtenidos de la programación y los que se tienen en el esquema térmico FZD 308090 F1/11.

Tabla 2. 8.- Comparación y validación de resultados del sistema MED

	Condensado por cámara [ton/h]				Salmuera por cámara [ton/h]				Condensado Total [ton/h]	Salmuera Total [ton/h]
	1	2	3	4	1	2	3	4		
Resultados calculados	13.27	12.56	12.32	6.36	24.23	49.17	74.35	99.29	57.81	99.29
Resultados de la MED-TUXPAN	12.84	12.26	12.23	5.87	24.66	49.90	75.17	100	56.50	100.00

2.1.4.- Sistema MED-LE (Multi Effect Distillation Low Enthalpy)

Se han localizado varias puntos de potencial geotérmico de baja entalpía con temperaturas de operación de aproximadamente 85°C, considerados como convenientes para implementar en un sistema MED. Uno de los mayores problemas de los sistemas de desalación térmicos es el aprovechamiento de la fuente energética, así como la generación del sistema de vacío que es primordial para poder llevar a cabo el proceso. Es importante que el sistema sea técnicamente sustentable, y se permita que el sistema pueda operar con un consumo mínimo de energía eléctrica y facilite la adquisición de equipos auxiliares.

Antecedentes y desarrollo de MED-LE

El proyecto iiDEA (antes IMPULSA IV) del Instituto de Ingeniería UNAM tiene como objetivo el diseño e implementación de sistemas que desalen agua de mar con energías renovables para satisfacer la demanda de agua en el país. Anteriormente se localizaron puntos de potencial geotérmico de baja entalpía en el país, y con la ubicación geografía de la Península de Baja California, la disponibilidad del agua de mar es un factor clave para la instalación de sistemas modulares de desalación.

Se trabajó de manera teórica la posibilidad de modificar un sistema MED aprovechando el recurso geotérmico como fuente energética, se realizó una modelación básica y se determinó la configuración y principios básicos de funcionamiento. En la Tabla 2.9 se presentan el resultado de las evaluaciones que se realizaron a sistemas modificados de desalación MED empleando el recurso geotérmico de baja entalpía como fuente térmica para la desalación, siendo estas alimentaciones en paralelo, en serie o combinaciones de éstas.

Tabla 2. 9 Parámetros de sistemas MED con geotermia de baja entalpía

	Paralelo	Serie	Propuesta 1	Propuesta 2	MED LE
Agua de alimentación [m ³ /h]	66	54	359	71	92
Destilado [m ³ /h]	21.5	20.2	16.5	26.6	27.8
Recuperación [-]	33%	37%	5%	37%	30%
Potencia bombas [kW]	18.8	24.6	95.8	40.5	26.7

Es necesario mencionar que estos resultados fueron un análisis termodinámico preliminar donde las propiedades del agua de mar y recurso geotérmicos se consideraron como agua pura, además de no estimarse el consumo energético del sistema de generación de vacío necesario en el proceso de evaporación. No obstante, estos fueron apropiados para la implementación del sistema y configuración.

Al modelo propuesto se le dio el nombre de MED-LE (MED Low Enthalpy) para manifestar el tipo de recursos empleado. Este tiene el mismo principio de operación que un sistema MED convencional para la evaporación, sin embargo difiere en el arreglo y equipamiento, mostradas las principales características en la Tabla 2.10.

Tabla 2. 10 Características operativas MED y MED-LE

	MED convencional	MED-LE
FUENTE ENERGÉTICA	Vapor	Recurso geotérmico de baja entalpía (líquido)
TEMPERATURAS DE OPERACIÓN	<70°C	85°C
APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO	Primer Efecto (cámara de evaporación)	El recurso es empleado en el Primer Efecto Posteriormente, se aprovecha en cámaras subsecuentes en intercambiadores secundarios inferiores
GENERACIÓN DE VACÍO	Eyectores de vapor	Hidroeyectores, Eyectores de aire comprimido, Turbocompresores

El esquema básico del sistema MED-LE es mostrado en la Figura 2.24, el sistema funciona en base a la evaporación de una toma en paralelo de agua de mar. Es importante recalcar que la modificación más importante es que el agua caliente (la fuente de calor) no se desecha, sino que continúa aprovechando a través de los demás efectos cediendo su energía para producir más vapor. Esta modificación hace que se mejore la eficiencia del proceso, principalmente reduciendo en el consumo energético por producto. Más adelante se presentarán los cálculos realizados y cuantificación del aprovechamiento de la energía para dicho proceso.

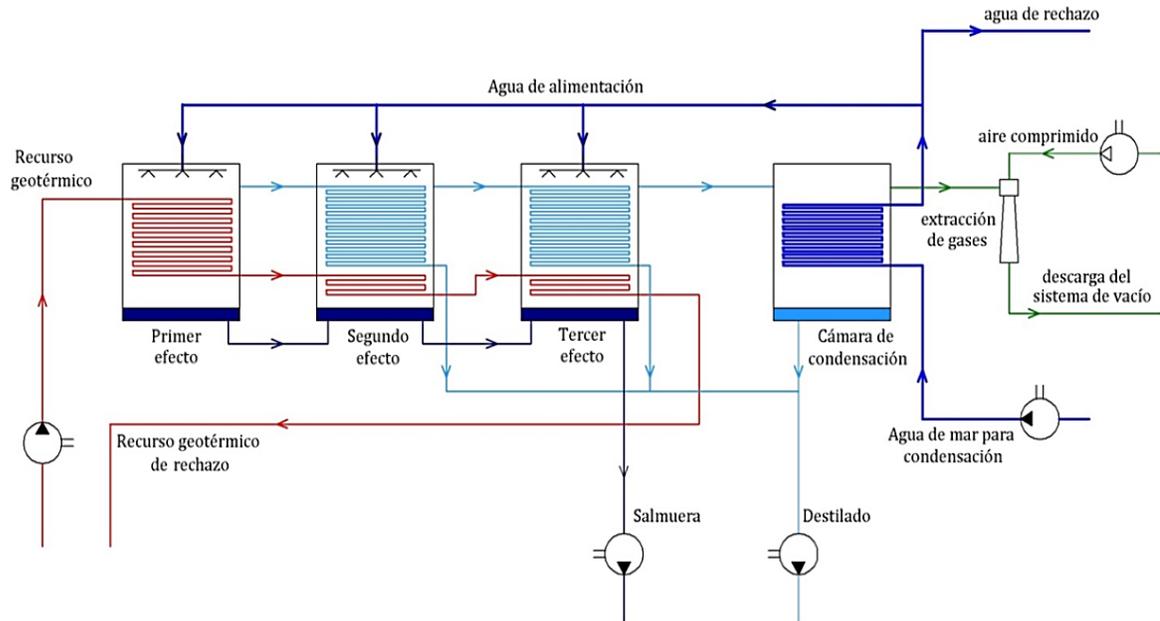


Figura 2. 23 Configuración sistema MED LE para aprovechamiento de los recursos geotérmicos de baja entalpía en procesos de desalación

Una dificultad que se presenta en este sistema, es que ya no se cuenta con un fluido motriz para generar el vacío. El sistema de generación de vacío permite modificar la temperatura de evaporación del agua de mar, generando la mezcla bifásica vapor/agua salina. Para esto se ha considerado emplear un sistema de eyectores de aire comprimido. Junto con el análisis termodinámico del sistema, se considerara la potencia necesaria para generar este vacío y eventualmente estimar el costo nivelado del agua producto.

El sistema MED-LE propone un sistema eficiente que emplee recursos renovables para producir agua desalada, mitigando la problemática de la distribución de agua de mar en sectores aislados del noreste del país, así como también disminuir el impacto ambiental generado por procesos de combustión empleados en las tecnologías de desalación.

Análisis energético

Para analizar el balance de masa y concentración del sistema de desalación MED-LE se toman las mismas ecuaciones que en los sistemas térmicos de desalación convencionales, en cuanto a la eficiencia térmica para el caso de la tecnología MED-LE no se puede emplear el parámetro GOR, ya que este está definido para el empleo de vapor. Se utiliza la relación de rendimiento PR (Performance Ratio), que es la cantidad de agua destilada por unidad de energía térmica. También conocida como rendimiento térmico:

$$PR = \frac{\dot{m}_d}{\dot{Q}_{sum}} \dots \dots \dots (Ec. 2.29)$$

Donde:

PR = Relación de rendimiento

\dot{m}_d = Gasto másico del agua destilada

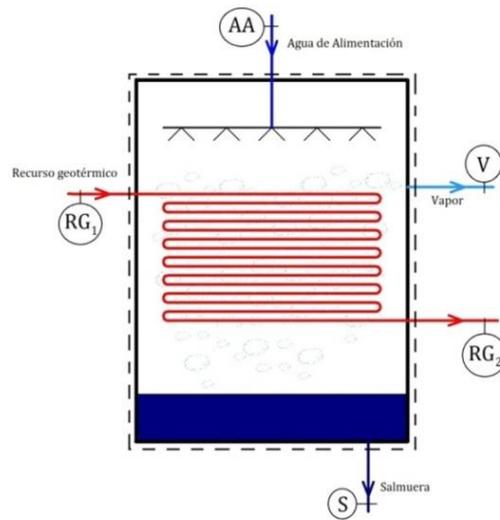
\dot{Q}_{sum} = Calor suministrado (Energía Térmica)

Para realizar los balances de masa y energía del sistema MED-LE se consideraron tres tipos de efecto:

- Primer efecto: en donde se aprovecha la mayor cantidad de energía térmica para la generación del primer flujo de vapor.
- Efectos Intermedios: en donde se genera vapor de las otras tomas de alimentación y se condensa el flujo de vapor del efecto anterior
- Efecto de condensación final: en donde se condensa el último flujo de vapor y se precalienta la toma de agua de mar

Balance de masa y energía

En las siguientes imágenes se muestran las configuraciones empleadas, así como el balance de masa y energía de cada una de ellas:



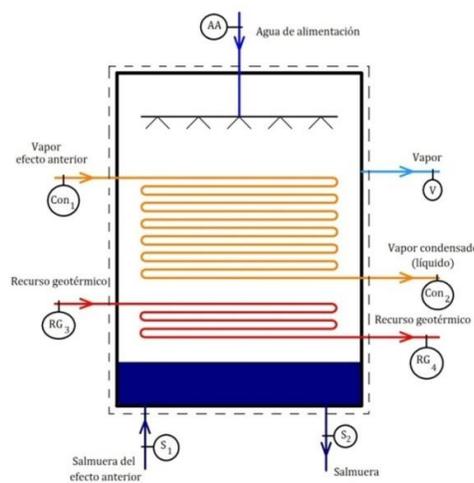
Balance de masa

$$\begin{aligned} \dot{m}_{AA} &= \dot{m}_V + \dot{m}_S \\ \dot{m}_{RG_1} &= \dot{m}_{RG_2} \end{aligned}$$

Balance de energía

$$\begin{aligned} h_{AA}\dot{m}_{AA} + h_{RG_1}\dot{m}_{RG_1} \\ = h_{RG_2}\dot{m}_{RG_2} + h_V\dot{m}_V + h_S\dot{m}_S \end{aligned}$$

Figura 2. 24.- Balance de masa y energía de la primera cámara de la MED-LE



Balance de masa

$$\begin{aligned} \dot{m}_{AA} + \dot{m}_{S_1} &= \dot{m}_V + \dot{m}_{S_2} \\ \dot{m}_{Con_1} &= \dot{m}_{Con_2} \\ \dot{m}_{RG_1} &= \dot{m}_{RG_2} \end{aligned}$$

Balance de energía

$$\begin{aligned} h_{AA}\dot{m}_{AA} + h_{RG_1}\dot{m}_{RG_1} + h_{Con_1}\dot{m}_{Con_1} + h_{S_1}\dot{m}_{S_1} \\ = h_V\dot{m}_V + h_{RG_2}\dot{m}_{RG_2} + h_{Con_2}\dot{m}_{Con_2} + h_{S_2}\dot{m}_{S_2} \end{aligned}$$

Figura 2. 25.- Balance de masa y energía de la segunda y tercera cámara de la MED-LE

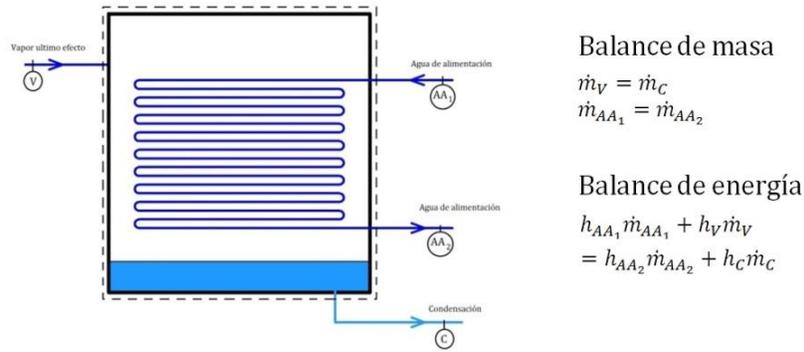


Figura 2. 26.- Balance de masa y energía del condensador de la MED-LE

Una vez que se obtienen los flujos de calor necesarios para la evaporación, se prosigue a diseñar los intercambiadores de calor. Para esto se emplea el método de las temperaturas Medias logarítmicas, el cual utiliza la ecuación general de transferencia de calor

$$\dot{Q} = UA(\Delta T_m) \dots \dots \dots (Ec. 2.29)$$

Para el cálculo del área de transferencia de calor se emplea:

$$A = \pi D_e L N \dots \dots \dots (Ec. 2.30)$$

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor se emplea la relación:

$$U_e = \left(\frac{1}{h_i} \cdot \frac{D_e}{D_i} + \frac{D_e}{2k} \cdot \ln \left(\frac{D_e}{D_i} \right) + \frac{1}{h_e} + R_f \right)^{-1} \dots \dots \dots (Ec. 2.31)$$

Los coeficientes de convección internos y externos se obtienen a través del empleo de correlaciones matemáticas donde generalmente se emplean los parámetros adimensionales Re y Pr.

Si se realiza un análisis de la transferencia de calor transversal a lo largo de la tubería, se podrá apreciar que no siempre se obtiene una diferencia de temperaturas constante. Es por ello que se emplea la LMTD para realizar una aproximación al promedio de temperaturas que se emplea.

$$LMTD = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln \left(\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}} \right)} \dots \dots \dots (Ec. 2.32)$$

Esta puede variar de acuerdo al tipo de proceso que se está llevando a cabo. Como se puede apreciar en la figura 2.27, se presentan gráficas del comportamiento de temperaturas en un intercambiador de calor.

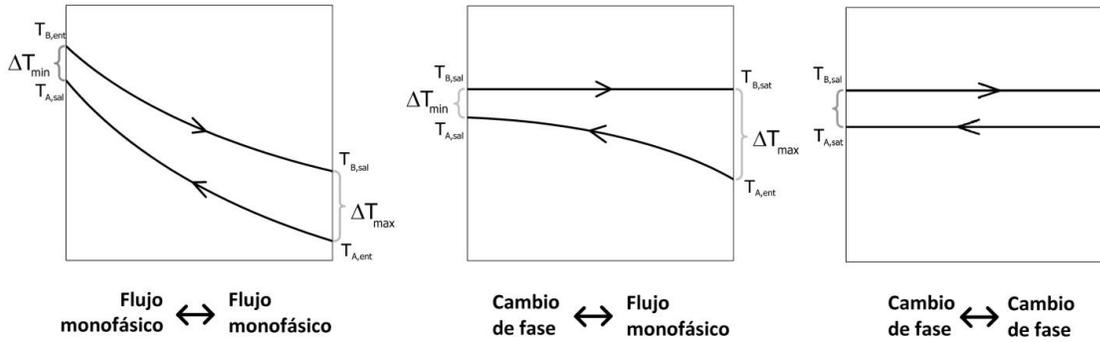


Figura 2. 27.- Diagramas de temperaturas para procesos de transferencia de calor

Como se puede apreciar en las gráficas, durante los procesos de intercambio de calor en flujos monofásicos, la diferencia de temperaturas se reduce gradualmente. Hay que observar que cuando existe proceso de cambio de fase se mantiene una temperatura constante y la diferencia entre temperaturas se reduce considerablemente. Sin embargo cuando existen cambios de fase tanto externos como internos, la diferencia de temperaturas es igual.

$$LMTD = \frac{(T_{B,sal} - T_{A,ent}) - (T_{B,ent} - T_{A,sal})}{\ln\left(\frac{T_{B,sal} - T_{A,ent}}{T_{B,ent} - T_{A,sal}}\right)} \quad \text{Flujos monofásico externo e interno.... (Ec. 2.33)}$$

$$LMTD = \frac{(T_{A,sal} - T_{A,ent})}{\ln\left(\frac{T_{B,sat} - T_{A,ent}}{T_{B,sat} - T_{A,sal}}\right)} \quad \text{flujo monofásico y cambio de fase (Ec. 2.34)}$$

$$LMTD = T_{B,sat} - T_{A,sat} \quad \text{Cambio de fases..... (Ec. 2.35)}$$

En base a estas ecuaciones se realizó una hoja de cálculo.

En la tabla 2.11 se muestran los datos de entrada para la hoja de cálculo del sistema MED-LE

Tabla 2. 11.- Datos de entrada para la hoja de cálculo del sistema MED-LE

DATOS DE ENTRADA				
Flujo másico de fluido geotérmico	0.56	[kg/s]	Temperatura de agua de mar	25 [°C]
Presión de fluido geotérmico	2	[bar]	Flujo másico de agua de mar/cámara	0.113 [kg/s]
Temperatura Fluido Geotérmico	85	[°C]	Porcentaje de gases no Condensables	1.8%
Concentración de sólidos en agua de mar	35000	[ppm]		

En la tabla 2.12 se muestran los datos de las cámaras que se ocuparon para realizar la hoja de calculo.

Tabla 2.12.- Datos para las cámaras del sistema MED-LE

DATOS DE CÁMARAS	
Efectos (cámaras)	3
Pinch de condensador [°C]	8.00
Presión en 1er cámara [barvac]	0.16
Caída de presión en cámaras subsecuentes [barvac]	0.03
Pinch entre tubo en cámara	3.00
ΔP en tubos del intercambiador [bar]	0.35
Porcentaje de gases No Condensables	14.4%
Factor de gases	8

La hoja de cálculo se esquematiza en el ANEXO 3, los resultados más importantes se listan en la siguiente tabla:

Tabla 2. 13.- Resultados obtenidos con la hoja de cálculo del sistema MED-LE

RESULTADOS	
Recuperación	22.0%
Factor de concentración máximo (FC)	1.3
Destilado	5.5 [m ³ /día]
Potencia de compresor para eyectores	4.12 [kW]
Trabajo Mecánico p/destilado	17.14 [kWh/m ³]
Rel Energía destilado	1096 [MJ/m ³]

La siguiente grafica esquematiza la relación entre concentración de sólidos y el flujo másico de entrada a la cámara, de acuerdo al flujo másico propuesto, obtenemos una concentración menor a las 45 000 [ppm] en la tercer cámara.

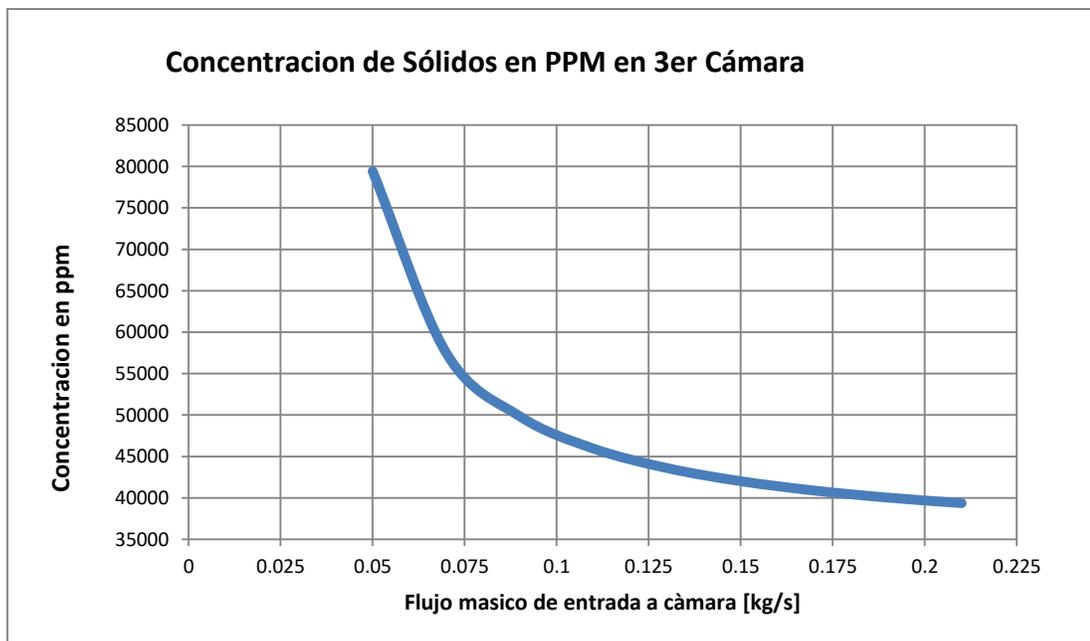


Figura 2. 28.- Concentraci3n de s3lidos en ppm en la tercera c3mara de la MED-LE

2.2.- OPERATIVIDAD Y DESEMPEÑO DE LA MED CON EL INTERCAMBIADOR DE PLACAS

Se ha mencionado que el uso de los intercambiadores de placas en los equipos que ocupan fluidos geotérmicos y/o agua de mar presenta una oportunidad de mejorar su rendimiento al eliminar tiempo muerto en el mantenimiento de los intercambiadores de tubos.

Se analizará el diseño de una desaladora con intercambiadores de placas; la cual se propone operé con fluido geotérmico de baja entalpía (temperatura de 90°C).

2.2.1.- Análisis energético

Ecuación de conservación de energía.

Expresa la cantidad y flujos de los diferentes tipos de energía que fluyen desde o hacia, e incluso dentro de un volumen de control previamente definido. Algebraicamente es:

$$\frac{dq}{dt} + \frac{dW}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint \left[\left(h + \frac{1}{2}v^2 + gz \right) \rho dV \right] + \iint \left[\left(h + \frac{1}{2}v^2 + gz \right) \rho(v) dA \right] \dots\dots\dots (Ec. 2.36)$$

Donde:

- | | |
|---------|---|
| dq/dt | =Diferencial de calor por unidad de tiempo. |
| dW/dt | =Diferencial de trabajo por unidad de tiempo. |
| h | =Entalpía. |
| dV | =Diferencial volumen. |
| dA | =Diferencial de área. |
| v | =Velocidad. |
| g | =Aceleración gravitacional. |
| z | =Elevación, altura. |
| ρ | =Densidad. |

Para aplicarla de la manera correcta, se toman los siguientes puntos:

- Estado permanente: Es decir, se tiene un proceso de intercambio de calor uniforme (constante) en todo momento y no hay variaciones en el proceso respecto al tiempo.
- Flujo estacionario: No hay acumulación de masa en el sistema.
- Las variaciones en energía cinética y potencial son despreciables.
- No se considera perdida de calor hacia los alrededores, es decir, se considera un sistema adiabático.
- Se determinaran las propiedades termodinámicas de acuerdo a las condiciones de cada estado; en ocasiones se usa la temperatura promedio para algunas propiedades, en dichos casos se aclara.
- La distribución total de ambos fluidos es uniforme en cada una de las placas.
- El flujo de masa caliente: En este caso el flujo másico de fluido geotérmico se considera como agua solamente.
- El flujo de agua fría: Que será el flujo másico de agua de mar, se considera como agua para definir sus propiedades termodinámicas.

- Se hace un análisis de concentración de sólidos en suspensión en el agua de mar y de gases incondensables en la misma.
- Los gases incondensables se consideran con las propiedades termodinámicas del aire: Nitrógeno (75.57%), Argón (1.27%) y Oxígeno (23.16 %). Los porcentajes en masa.

Ecuación de conservación de masa.

Indica las transferencias, acumulaciones y/o pérdidas de masa en un volumen de control definido. Se define cuantitativamente como:

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \iiint [\rho dV] + \iint [\rho v dA] \dots\dots\dots (Ec. 2.37)$$

Donde:

- ρ =Densidad.
- dV =Diferencial volumen.
- dA =Diferencial de área.
- v =Velocidad

Las consideraciones:

- Estado permanente.
- Flujo estacionario.
- Para e agua de mar, flujo incompresible.
- Para el vapor, se considera como sustancia pura.

Balance y factor de concentraciones.

El balance de concentraciones, es una extensión del balance de masa, ya que, un sólido disuelto también es masa y en dado caso, es elemento de un volumen de control dado. Por otra parte el factor de concentración se define como una relación entre la concentración de un soluto disuelto en una sustancia respecto a otra de referencia, la sustancia de referencia puede ser arbitraria y tener o no el soluto en cuestión.

Para un sistema de desalación, este factor se define como la relación de salinidad de un concentrado entre el agua de alimentación para el proceso, cuantitativamente:

$$FC = \frac{S_{producto}}{S_{agua alimentacion}} \dots\dots\dots (Ec. 2.38)$$

Donde, S, es la salinidad del fluido, agua de mar en este caso.

Eficiencia térmica.

En un sistema de desalación, como el tratado en este proyecto, donde no se utiliza vapor de agua como fluido de aporte de calor y en vez, de ello se utiliza fluido geotérmico de baja entalpía, es acertado utilizar la expresión:

$$PR = \frac{\dot{m}_{destilado}}{\dot{Q}_{sumistrado}} \dots\dots\dots (Ec. 2.39)$$

Una relación de rendimiento cuya razón es la masa de destilado ($\dot{m}_{destilado}$) obtenido respecto a una cantidad neta de calor total suministrado al sistema ($\dot{Q}_{sumistrado}$).

2.2.2.- Balance de masa y energía en cámaras.

Para ello se han considerado tres efectos del sistema MED de placas y un último proceso de condensación. Se describen a continuación:

- Primer efecto: Donde se aprovecha toda la cantidad de energía térmica disponible por parte de fluido geotérmico, con ella se forma cierta cantidad de vapor, que pasa al efecto siguiente.
- Segundo y tercer efecto: en ellos se aprovecha la energía térmica remanente de los procesos anteriores, mediante procesos de evaporación-condensación.
- Proceso de condensación. Cuyo propósito es condensar el vapor proveniente del último efecto, y a la vez lograr un precalentamiento del agua de mar que ha de entrar en la primera cámara.

Lo anterior se esquematiza en la figura 2.29:

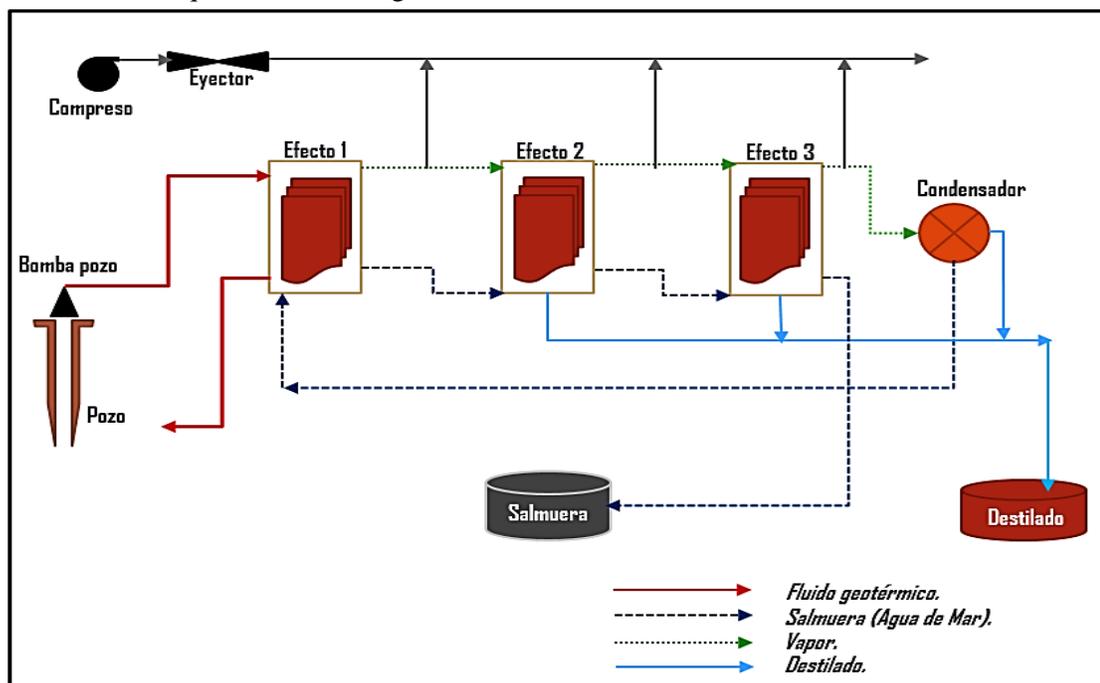


Figura 2. 29.- Representación gráfica de la planta desaladora tipo MED de placas.

Para describir el sistema completo se ha subdividido en subsistemas, cuatro para ser exactos, los cuales se describen a continuación.

Antes, será conveniente definir las siguientes variables que tienen una continua repetitividad para el desarrollo de la formulas siguientes:

Variables	Subíndices
\dot{m} Flujo de masa.	S Salmuera.
h Entalpia.	G Fluido geotérmico.
x Calidad.	M Agua de mar.
F Factor de gases.	NC No condensables.
S Salinidad.	$1,2,3$ Referente al efecto (n).

Cuando el subíndice (V), tenga un apostrofe (‘), indica que al vapor (V) se le ha restado la cantidad correspondiente de gases incondensables.

Primer efecto.

Balance masa y energía:

$$\dot{m}_{G1}(h_{G1} - h_{G2}) = \dot{m}_{V1}h_{V1} + \dot{m}_{S1}h_{S1} - \dot{m}_{M1}h_{M1} + F_{NC}\dot{m}_{M1}h_{NC1} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.40})$$

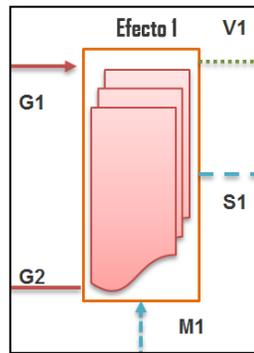


Figura 2. 30.- Balance de masa y energía de la primera cámara en una MED de placas

Conociendo que las fracciones de vapor y salmuera generada tienen íntima relación con la calidad del fluido generado en el interior de la cámara, se obtiene la siguiente expresión útil:

$$\dot{m}_{M1} = \frac{\dot{m}_{G1}(h_{G1}-h_{G2})}{x_1(h_{V1}+F_{NC}h_{NC1}-h_{S1})+(h_{S1}-h_{M1})} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.41})$$

Y el factor de concentración:

$$FC = \frac{S_{S1}}{S_{M1}} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.42})$$

Segundo efecto.

Balance masa y energía:

$$\dot{m}_{V1'}(h_{V1'} - h_{D1}) = \dot{m}_{V2}h_{V2} + \dot{m}_{S2}h_{S2} - \dot{m}_{S1}h_{S1} + F_{NC}\dot{m}_{S1}h_{NC} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.43})$$

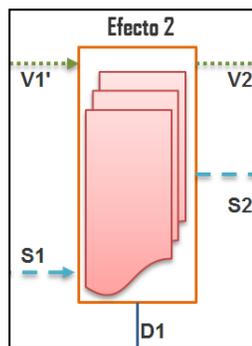


Figura 2. 31.- Balance de masa y energía de la segunda cámara en una MED de placas

De una manera similar al proceso anterior, la calidad está asociada con los remanentes de la cámara respecto a la salmuera de entrada:

$$x_1 = \frac{\beta}{1+\beta} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.44})$$

Donde β , se ha definido como:

$$\beta = \frac{x_2(h_{V2} + F_{NC}h_{NC2} - h_{S2}) + (h_{S2} - h_{S1})}{(h_{V1'} - h_{D1})} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.45})$$

Y el factor de concentración:

$$FC = \frac{S_{S2}}{S_{S1}} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.46})$$

Tercer efecto.

Balance masa y energía:

$$\dot{m}_{V2'}(h_{V2'} - h_{D2}) = \dot{m}_{V3}h_{V3} + \dot{m}_{S3}h_{S3} - \dot{m}_{S2}h_{S2} + F_{NC}\dot{m}_{S2}h_{NC3} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.47})$$

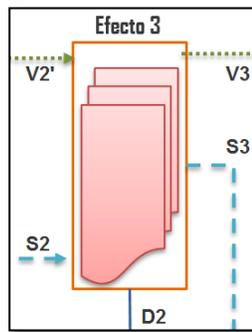


Figura 2. 32.- Balance de masa y energía de la tercera cámara en una MED de placas

De una manera similar al proceso anterior:

$$x_2 = \frac{\gamma}{1+\gamma} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.48})$$

Donde β , se ha definido como:

$$\gamma = \frac{x_3(h_{V3} + F_{NC}h_{NC3} - h_{S3}) + (h_{S3} - h_{S2})}{(h_{V2} - h_{D2})} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.49})$$

Y el factor de concentración:

$$FC = \frac{S_{S3}}{S_{S2}} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.50})$$

Condensador.

Su balance de energía es:

$$\dot{m}_{M0'}(h_{M0'} - h_{M0}) = \dot{m}_{V3'}h_{V3'} - \dot{m}_{D3}h_{D3} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.51})$$

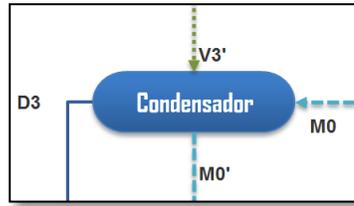


Figura 2. 33.- Balance de masa y energía del condensador en una MED de placas

De donde:

$$\dot{m}_{M0'} = \frac{x_3 \dot{m}_{S2}(h_{V3'} - h_{D3})}{(h_{M0'} - h_{M0})} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.52})$$

$$\dot{m}_{M1} = \dot{m}_{M0'} - (\text{exceso de agua de mar}) \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.53})$$

Análisis de concentración de salmuera.

Se hace para la cámara 1, pero de igual manera aplica para todos los demás efectos:

$$\dot{m}_{M1}S_{M1} = \dot{m}_{V1}S_{V1} + \dot{m}_{S1}S_{S1} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.54})$$

En primera instancia se dice que el vapor producido, no contiene concentración alguna de sales, de modo que $S_{V1} = 0$. En adición, el factor de concentración se ha definido como:

$$FC = S_{S1} / S_{M1} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.55})$$

Estas consideraciones arrojan que $FC = \dot{m}_{M1} / \dot{m}_{S1}$. Se sabe que $\dot{m}_{S1} = x_1 \dot{m}_{M1}$. De esta manera el factor de concentración se puede relacionar con la calidad, es decir la cantidad de energía que tenemos que agregar a cada una de las cámaras para que se genere cierta cantidad de vapor sin llegar a una concentración excesiva de sólidos entre las placas.

$$x_3 = \frac{CF_3 - 1}{CF_3} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.56})$$

2.2.3.- Metodología para resolución.

De acuerdo a las ecuaciones previamente desarrolladas, se observa que una es dependiente de la siguiente y así sucesivamente, hasta llegar a la calidad en la cámara 3, que depende del factor de concentración, es lo que se ha buscado; la razón es simple. Un equipo de desalación deberá contar con periodos de mantenimiento, muchas veces continuos, si durante el diseño se controla el factor de ensuciamiento, o mejor expresado de concentración de sólidos en la salmuera de salida, también se pueden controlar los periodos de mantenimiento. En tanto, la metodología es sencilla:

1. Proponer un factor de concentración de salmuera de salida.
2. Determinar la calidad requerida en la cámara 3, y obtener la masa de agua de enfriamiento.
3. Encontrar la calidad en la cámara 2, y posteriormente en la 3.

4. Obtener la cantidad de agua de mar de alimentación de la primera cámara.
5. Determinar la concentración de salmuera en la cámara 3.
6. Repetir los pasos 1-5 de manera iterativa hasta encontrar un valor de masa de agua de mar adecuado al factor de concentración propuesto.
7. Obtener el exceso de agua.

Así es como se ha desarrollado una hoja de cálculo en Excel habilitada para realizar las iteraciones automáticamente. Esta se presenta en el siguiente subtema.

2.2.4.- Resultados

Datos de inicio.

Que son las condiciones operativas solicitadas a la planta y cada una de sus cámaras, también estados termodinámicos del fluido de aporte energético.

Tabla 2. 14.- Datos de entrada para el cálculo de la MED de placas

DATOS DE ENTRADA					
Flujo másico de fluido geotérmico	0.60	kg/s	Temperatura de agua de mar	25	°C
Presión de fluido geotérmico	3.615	bar	Flujo másico de agua de mar/cam	0.113	kg/s
Temperatura de fluido geotérmico	85	°C	Porcentaje de gases no condensables	1.8	%
Concentración de sólidos en mar	35000	ppm	Concentración en cámara	35	kg/m ³
Temperatura mínima de fluido geotérmico	60	°C	Factor de concentración máximo E3/E2	1.095	
Altura sobre nivel del mar	0	m	Presión atmosférica	1.0133	bar

Tabla 2. 15.- Datos establecidos para el cálculo de la MED de placas

DATOS CONSIDERADOS		
Efectos (cámaras)	3	
Pinch de condensador	8	°C
Presión abs en Cámara 1	16	kPa
DP entre cámaras sigts	3	kPa
Pinch de placas	3	
Caída de presión placas	0.80	bar]
Porcentaje de gases no condensables	14.40	%
Factor de gases	8	

Los resultados de interés de la hoja de cálculo de la MED de placas se muestran en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16.- Resultados principales del cálculo de la MED de placas

Porcentaje de desalación	24.64	
Rendimiento PR	0.0007	m ³ /MJ
	1362	kJ/m ³
Calor Suministrado	66.6	kW
Trabajo mecánico para eyección	5.6	hp
	4.1	kW
	16.6	kWh/m ³
Destilado por día	4.21	m ³ /día
Salmuera de desecho	15.88	m ³ /día
Concentración de salmuera de desecho	45682	ppm

Para una mejor apreciación general se ha recurrido al siguiente diagrama, se muestran los parámetros más importantes (flujo másico y temperatura).

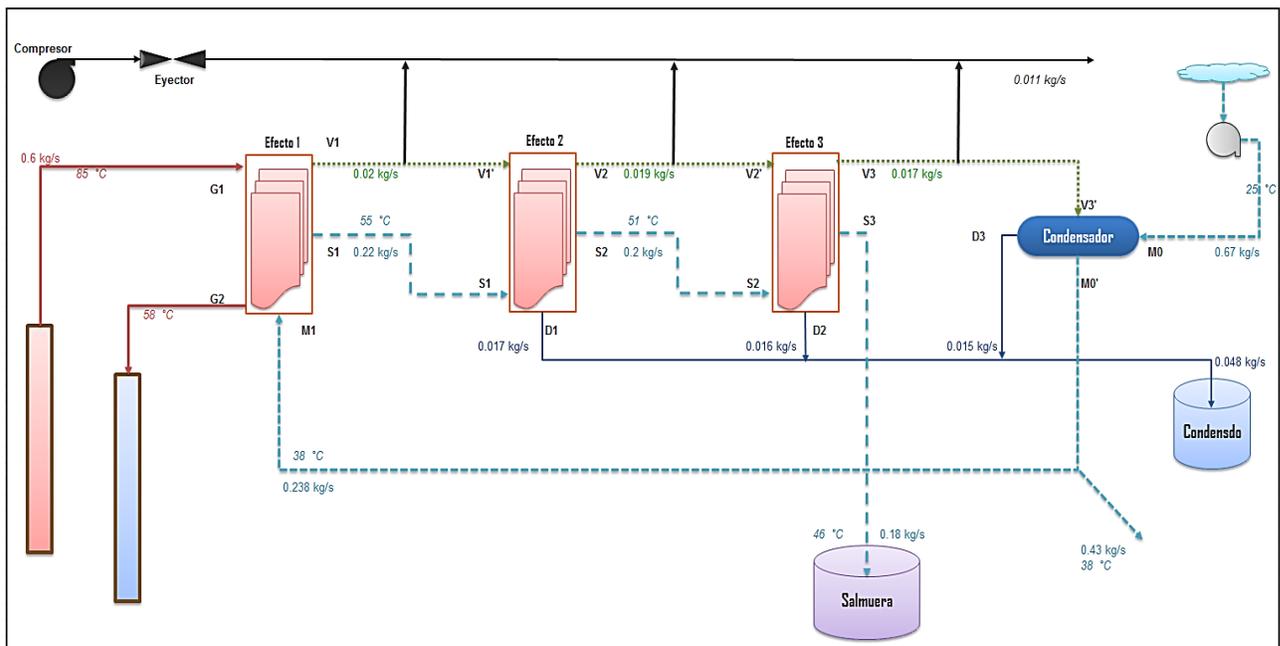


Figura 2. 34.- Parámetros principales obtenidos de la MED de placas

El análisis y resultado es satisfactorio, pero hay una desventaja latente, la temperatura en el punto G2, respecto al fluido geotérmico de salida está limitada por la presión de operación en la cámara 1. A diferencia de la propuesta MED-LE, donde la temperatura del fluido geotérmico de desecho es de 48 [°C], no es posible extraerle más energía al fluido geotérmico en la planta MED. Por otro lado, se sabe que el fluido geotérmico comienza un proceso de deposición de partículas acelerado, cuando se opera por temperaturas inferiores a los 60 [°C], se puede hablar de una limitante más, entonces, la propuesta MED placas tiene una ventaja respecto a los 60 [°C] máximos de operación.

2.3. COMPARATIVA DE LOS SISTEMAS PROPUESTOS MED, MED-LE Y MED PLACAS.

Para ello se ha considerado agua pura como sustancia de trabajo, de igual manera la utilización de tres cámaras y aspectos tanto operativos como medioambientales, como a continuación se detallan:

En la Tabla 2.17 se encuentran los datos de entrada de los sistemas de desalación para su comparativa energética.

Tabla 2. 17.- Datos de entrada de los sistemas de desalación para su comparativa

DATOS DESALADORAS		
Efectos (cámaras)	3	
Pinch de condensador	8	°C
Presión abs en Cámara 1	16	kPa
DP entre cámaras sigts	3	kPa
Pinch de placas	2	
Caída de presión placas	0.80	bar]
Porcentaje de gases no condensables	14.40	%
Factor de gases	8	

Para poder evaluar los diferentes sistemas de desalación se tomaron los datos termodinámicos de la Tabla 2.18.

Tabla 2. 18.- Datos termodinámicos de entrada de los sistemas de desalación

DATOS DE ENTRADA TERMODINAMICOS					
Flujo másico de fluido geotérmico	0.60	kg/s	Temperatura de agua de mar	25	°C
Presión de fluido geotérmico	2	bar	Flujo másico de agua de mar/cam	0.113	kg/s
Temperatura de fluido geotérmico	85	°C	Porcentaje de gases no condensables	1.8	%
Concentración de sólidos en mar	35000	ppm	Concentración en cámara	35	kg/m ³
Temperatura mínima de fluido geotérmico	55	°C	Factor de concentración máximo E3/E2	1.095	
Altura sobre nivel del mar	0	m	Presión atmosférica	1.0133	bar

Las condiciones operativas iniciales, son las mismas para las dos propuestas, únicamente varía el pinch en tubos de la desaladora MED-LE, que a diferencia de los 2°C de la MED de placas, es de 3 °C. El flujo másico de agua de mar de alimentación, también es diferente, pero eso se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 2. 19.- Tabla de resultados comparativos entre los sistemas de desalación.

SISTEMAS EN CUESTIÓN	MED-LE	MED-pL	MED-C	Unidades
PORCENTAJE DESALACIÓN	23,6%	24,5%	25.1%	
RENDIMIENTO	0,00080	0,0007	0.0007	[m ³ /MJ]
Pr	1257	1358	1375	[kJ/m ³]
CALOR SUMINISTRADO	89,8	69,1	58.4	[kW]
TRAB MECÁNICO PARA EYECCIÓN	5,6	5,6	5,6	hp
	16,6	16,6	16,6	kWh/m ³
DESTILADO POR DÍA	5,87	4,39	3.66	[m ³ /día]
SALMUERA DE DESECHO	22,18	16,5	13.82	[m ³ /día]
CONCENTRACIÓN DE SALMUERA DE DESECHO	45663	45669	45669	[ppm]
PRESIÓN EN CÁMARA 1	0,16	0,16	0,170	[bar]
PRESIÓN EN CÁMARA 2	0,13	0,13	0,135	[bar]
PRESIÓN EN CÁMARA 3	0,10	0,10	0,100	[bar]
AGUA DE MAR DE ALIMENTACIÓN A CÁMARAS	0,34	0,25	0,207	[kg/s]
TEMPERATURA DE SALIDA DE F GEOTÉRMICO	48	57.3	61.6	[°C]

Se cuidó que el factor de concentración en la tercera cámara para las tres propuestas, sea de 1.309 respecto a la concentración de sólidos inicial.

Graficas comparativas de rendimiento

Se han elaborado algunas graficas de sensibilidad comparando teóricamente las tres propuestas mencionadas.



Figura 2. 35.- Comparativa del rendimiento del porcentaje de destilado vs la temperatura del recurso geotérmico

Se puede notar que la MED-LE es independiente de la temperatura del recurso geotérmico en cuanto al porcentaje de desalación, lo que representa este porcentaje es la razón del agua producto (agua dulce) por el agua de alimentación (agua de mar) que se ingresa a las desaladora, indicando que al aumentar la temperatura del recurso geotérmico la única que nos seguirá dando un rendimiento de destilado igual o similar será la MED-LE. En la Figura 2.36 se presenta un complemento a la gráfica anterior, la cual indica

el destilado por día de cada planta desaladora, se muestra que la MED-LE tiene mayor destilado con lo cual si el porcentaje de destilado para temperatura menores de 95°C es mayor para las desaladoras MED-C y MED-PL no representa obtener un volumen mayor de agua destilada o agua producto.

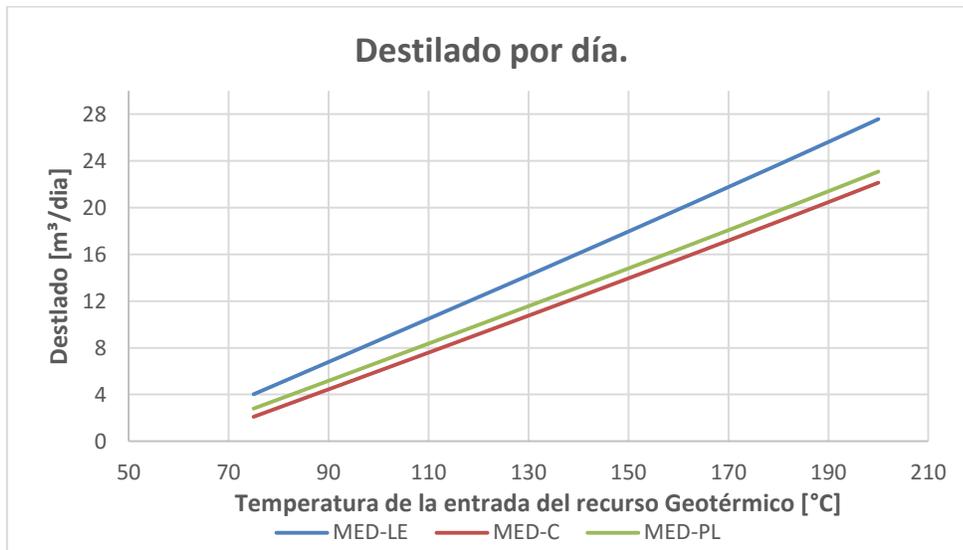


Figura 2. 36.- Comparativa del destilado por día vs la temperatura de entrada del recurso geotérmico.

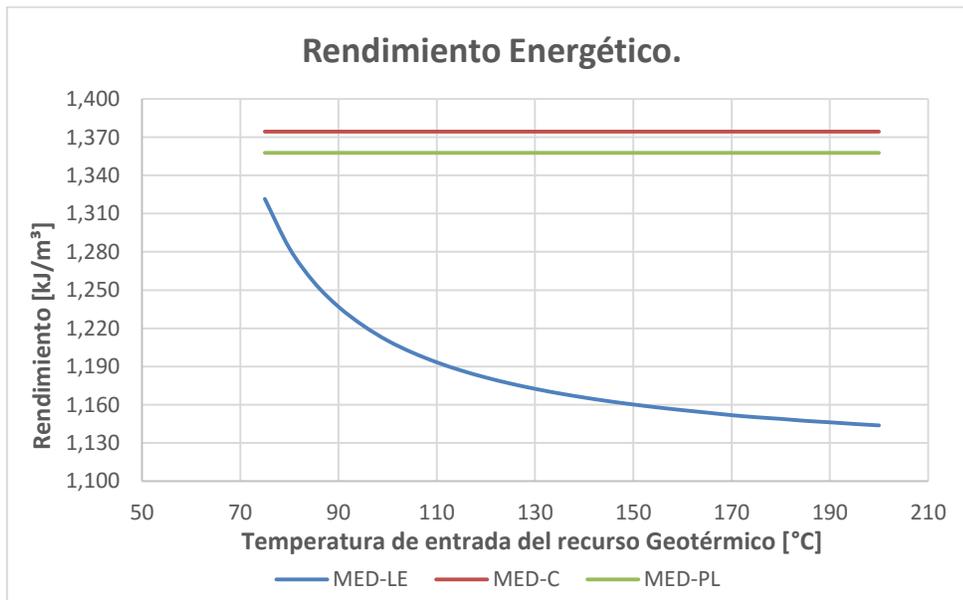


Figura 2. 37.- Comparativa del rendimiento energético vs la temperatura de entrada del recurso geotérmico

En la figura 2.37 se muestra la comparativa energética de las propuestas estudiadas la cual muestra que la MED-LE tiene un mayor rendimiento energético ya que por menos kJ de energía térmica otorga mayor volumen de agua producto y al aumentar la temperatura del recurso geotérmico muestra un mayor rendimiento.

2.4.- CONCLUSIONES.

El sistema MED-LE, tiene un menor porcentaje de recuperación de destilado por unidad de agua de mar suministrada, pero en general demuestra ser un sistema atractivo, ya que se obtiene mucho destilado con poca cantidad de energía térmica. Requiere mayor agua de alimentación.

El sistema MED de placas, tiene una mayor eficiencia, pero es debido a que su alimentación de agua de mar es menor, ya que, como se observa en la tabla, requiere mayor energía para destilar agua. Se obtienen 1.5 [m³/día] menos que el sistema MED-LE. El agua de mar y la salmuera obtenida es menor en el sistema MED de placas, lo cual se refleja en una menor potencia en bombas.

La desventaja del sistema MED-LE es la temperatura de salida del fluido geotérmico, es baja y por ende la cantidad de sólidos que se han de sedimentar es mayor que en la MED. La ventaja que podría representar el sistema MED de placas es la minimización de sedimentos, el tamaño de la unidad (menor) y los periodos de limpieza.

El sistema MED convencional, tiene una cantidad de destilado mucho menor que las otras dos propuestas, debido al pinch (acercamiento) de los tubos en las cámaras, que para este caso fue de 5 [°C]. Esto impide extraer mucho calor al agua geotérmica, además los procesos de condensación- evaporación en las cámaras subsecuentes deben tener los 5 [°C] de diferencia, si no, el proceso no ocurre; esto último limita aún más las presiones de evaporación.

3. ANÁLISIS DE LA OPERATIVIDAD Y DESEMPEÑO DE LA PLANTA PWG ACOPLADA A UN SISTEMA MED-LE CON INTERCAMBIADOR DE PLACAS

En este capítulo se mostrarán las propuestas de los esquemas de acoplamiento entre el ciclo PWG y la MED-LE, empezando por esquemas de las propuestas y haciendo un balance energético para definir una propuesta priorizando el minimizar el tiempo de mantenimiento y las afectaciones características del recurso geotérmico en los equipos del dispositivo.

Una vez que se defina la propuesta final del acoplamiento se realizará un estudio energético con más detalle realizando una comparativa teórica con los sistemas convencionales similares a la propuesta.

3.1.- ANÁLISIS DE LAS PROPUESTAS DE ACOPLAMIENTO DEL CICLO PWG CON EL SISTEMA MED-LE

Propuesta 1

La primera propuesta de acoplamiento se presenta en la Figura 3.1 en la cual se propone que el recurso energético (geotérmico) de la PWG una vez que otorgo la energía térmica al ciclo al salir del intercambiador de placas se ocupe como el recurso geotérmico para el sistema MED-LE, de acuerdo a la Figura 2.16 donde se muestra la hoja de cálculo del ciclo PWG, la temperatura del recurso geotérmico es de aproximadamente 106 °C lo cual representa una oportunidad de aprovechamiento en tipo de cogeneración. Al tener este acoplamiento se presentan varias ventajas, entre las cuales se encuentra que sólo se tendría una alimentación o fuente del recurso geotérmico para los dos dispositivos, se obtiene un mayor provecho de la energía térmica contenida en el recurso geotérmico y en un solo dispositivo se podrían controlar las problemáticas características de aprovechar el fluido geotérmico. Aunque esta opción sigue presentado el problema latente al utilizar el recurso geotérmico en las cámaras de la MED-LE sabiendo que se pueden presentar rápidas incrustaciones y periodos de mantenimiento largos como se mencionó en capítulo 2.1.3.

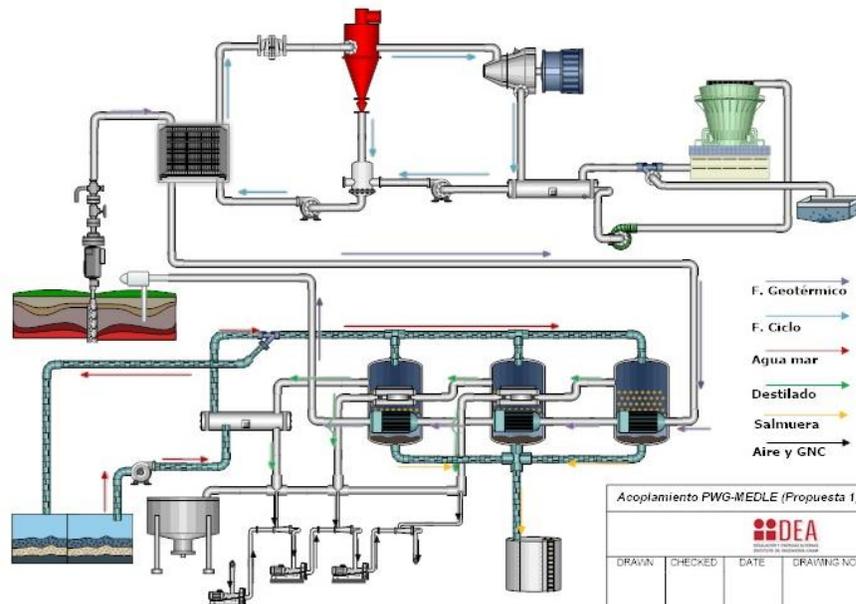


Figura 3.1. Acoplamiento PWG MED-LE, Propuesta 1: utilización del recurso geotérmico de la salida de la PWG como fuente energética del sistema MED-LE.

En esta propuesta la configuración para el ciclo PWG no cambia ni se modifica ninguno de sus componentes, y en cuanto a al MED-LE esta debe de adaptarse a las condiciones de salida del recurso geotérmico tanto de gasto como de temperatura.

Propuesta 2

En esta propuesta, al igual que en la propuesta 1 se reutiliza el recurso geotérmico remanente del ciclo PWG pero se añade un intercambiador de placas, en el cual se presenta la ventaja que el fluido geotérmico no pase por las cámaras de evaporación de la MED-LE y se con ello se reduzcan los problemas de incrustación. El fluido geotérmico solo tendría contacto con el intercambiadores de calor de placas, lo cual como ya se ha mencionado presentan un mantenimiento en corto tiempo representando un mayor factor de planta. El utilizar un equipo extra añade costos extras tanto del quipo como de los auxiliares del mismo, otra desventaja que se podría presentar en la perdida de temperatura debido al pinch o acercamiento del intercambiador y una caída de presión. En la Figura 3.2 se muestra la configuración de la segunda propuesta de acoplamiento.

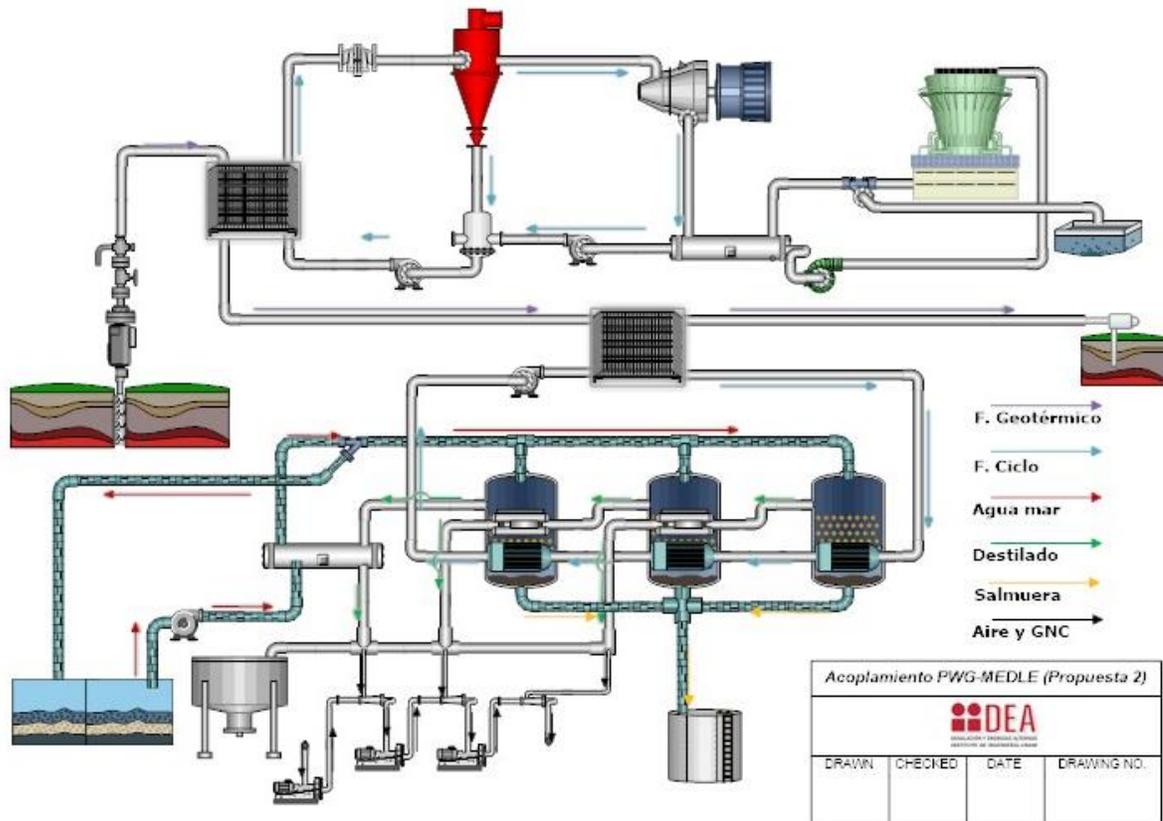


Figura 3.2.- Acoplamiento PWG MED-LE Propuesta 2.- utilizando el recurso geotérmico de la salida del ciclo PWG con un intercambiador de placas

En este propuesta la configuración para el ciclo PWG no cambia ni se modifica ninguno de sus componentes, y en cuanto a al MED-LE esta debe de adaptarse a las condiciones de salida del recurso geotérmico tanto de gasto como de temperatura.

Propuesta 3

Se propone un esquema de acoplamiento en el que se tenga el mínimo contacto de los equipos con el recurso geotérmico, por lo que se propone un esquema de acoplamiento en el que el único equipo que tendrá contacto con el recurso geotérmico sea el intercambiador de placas, el cual como se ha mencionado en este capítulo tiene un fácil mantenimiento.

A continuación en la Figura 3.3 se muestra la propuesta 3 de acoplamiento.

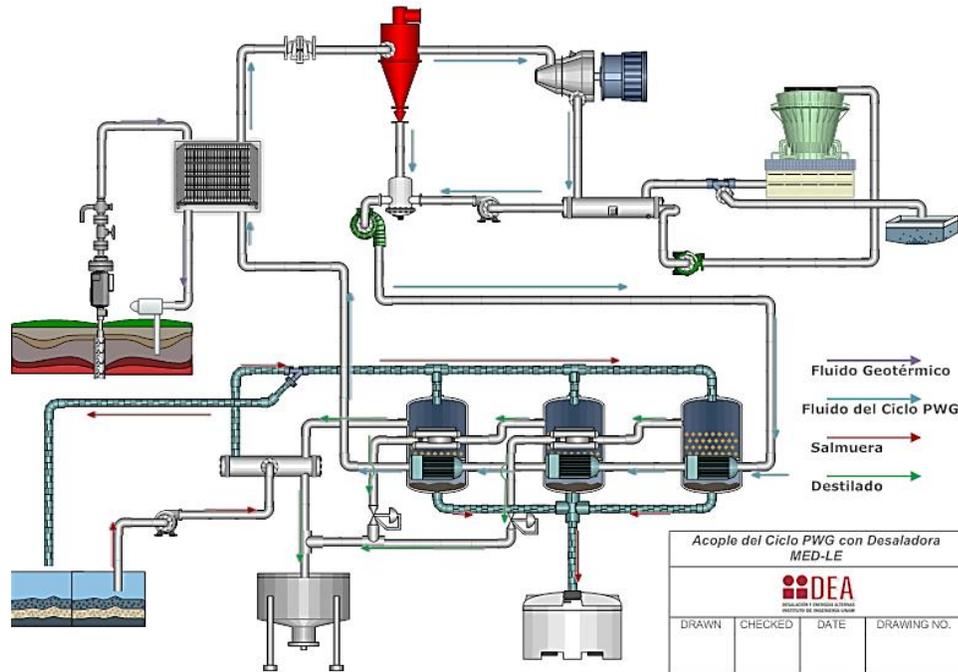


Figura 3.3.-Propuesta de acoplamiento del ciclo PWG con el sistema MED-LE propuesta 3.- utilizando el fluido de trabajo del ciclo PWG para darle la energía térmica al sistema MED-LE

Como se muestra en la figura 3.3 el fluido de trabajo propuesto en el ciclo PWG (agua) después de pasar por el mezclador se hace pasar por las cámaras del sistema MED-LE y al salir del sistema se hace pasar al ciclo PWG para realizar nuevamente el trabajo de generación. Con ello se realiza una cogeneración del ciclo PWG con la MED-LE.

Al tener esta configuración el ciclo PWG alimentó de energía térmica y eléctrica al sistema MED-LE dando la oportunidad de tener un sistema aislado y consiguiendo obtener energía eléctrica y agua de mar en comunidades y/o sistemas aislados en un sistema en cascada.

3.2.- ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL SISTEMA DE ACOPLAMIENTO PWG MED-LE

Se realizó el análisis energético de las propuestas en las cuales se tomaron como base las ecuaciones descritas en el segundo capítulo para cada uno de los sistemas, se decidió utilizar un ciclo PWG de 10 kWe brutos como base del acoplamiento, en el cual las tres propuestas se adaptaron y acoplaron a las características térmicas de este ciclo. A continuación se muestran los datos de entrada. Todos los cálculos se realizaron con el programa REFPROP 9.1.

En la tabla 3.1 se encuentran los datos de los quipos utilizados para el cálculo del ciclo de 10 kWe, el cual se ocupó como base para la realización de los cálculos de los acoplamientos.

En el ANEXO 4 se muestran punto por punto los cálculos que se realizaron con el programa REFPROP 9.1 para el ciclo de 10 KW.

Tabla 3. 1.- Datos de los equipos para el ciclo PWG de 10 KW

DATOS DE LOS EQUIPOS	
Eficiencia bomba de pozo%	82
Eficiencia turbina%	85
Eficiencia intercambiador %	95
ΔP Caída de Presión (bar)	0.5
Acercamiento de temperatura °C	3
Eficiencia bomba G %	82
Eficiencia bomba H %	82
Eficiencia bomba de circulación %	82
Eficiencia del condensador %	85

En la tabla 3.2 se muestran los resultados importantes de la hoja de cálculo del ciclo PWG de 10 kW.

Tabla 3. 2.- Resultados del Ciclo PWG que se ocupó como base para el análisis energético de las propuestas de acoplamiento con el sistema MED-LE

RESULTADOS IMPORTANTES	
Potencia Bruta kW	10.1
Potencia Neta kW	9.7
Eficiencia térmica del ciclo %	4.5
Eficiencia térmica de desalación %	48.8
Energía máxima suministrada kW	42
Eficiencia Exergetica del ciclo %	23.4
Potencia Térmica kW	106.1
Eficiencia térmica de cogeneración	53.3

Los resultados importantes en la propuesta I y II son que la T4 que es la temperatura del recurso geotérmico después de pasar por el intercambiador de calor la cual tiene un valor de $T_4=50.5$ °C después de haber pasado por el sistema MED-LE en lugar de reinyectar a una temperatura de 106 °C aproximadamente. Otro punto importante es que en el ciclo PWG el gasto del fluido geotérmico y el gasto del fluido de trabajo son similares lo cual cobra importancia para la propuesta 3.

Teniendo como antecedente las propuestas de acoplamiento. Para un análisis de diferentes configuraciones en el acople del ciclo PWG, y la planta de desalación MED-LE, se ha realizado la comparativa entre las tres propuestas, enumeradas como sigue:

- Con fluido geotérmico: Configuración analizada con anterioridad, la cual consta de tres cámaras con saltos en temperatura iguales a lo través de los tres efectos, 17 °C. La energía térmica, es remanente del ciclo PWG.
- Con fluido de operación del ciclo: En esta configuración se utiliza el agua del ciclo PWG como fuente de calor. Los saltos de presión son uniformes entre cada una de las cámaras o efectos, con saltos en temperatura de 17 °C.
- Con fluido de operación del ciclo y precalentamiento con fluido geotérmico: En esta configuración se propone utilizar fluido geotérmico para un precalentamiento del agua de mar que entra a cada una de las cámaras, el fluido del ciclo PWG se utiliza como fuente de calor a cada una de las cámaras. Los saltos de temperatura son uniformes, de 17 °C.

Para el análisis se proponen los siguientes datos operativos para cada una de las cámaras y el acoplamiento.

Tabla 3. 3 Datos Operativos propuestos para las cámaras del sistema MED-LE

Datos de los Equipos MED-LE	
Efectos (cámaras)	3
Pinch de condensador [°C]	8.00
ΔT entre cámaras [°C]	17.00
Pinch de tubo en cámara	6.00
ΔP de cámaras [bar]	0.35
Porcentaje de gases NC	14.4%
Factor de gases	8

Condiciones Atmosféricas		
Temperatura de agua de mar	22	[°C]
Concentración de sólidos en agua de mar	35	[kg/m ³]
Presión atmosférica	1.013	[bar]

Para fines comparativos se presenta, una tabla con factores de operaciones importantes, tanto para el ciclo PWG como para el proceso de desalación MED-LE operando por separado; posteriormente se visualizaran, las ventajas o desventajas logradas al acoplar ambos sistemas.

Tabla 3. 4 Parámetros importantes de la PWG y la MED-LE antes del acoplamiento

PWG		MED-LE	
Flujo másico geotérmico [kg/s]	0.58	Flujo másico geotérmico [kg/s]	0.56
Flujo másico operación [kg/s]	0.55	Flujo agua de mar a cámara [°C]	0.113
Autoconsumo [kW]	0.30	Temperatura F. Geotérmico [°C]	90
Potencia neta [kW]	9.8	FC en tercer efecto	1.298
Eficiencia térmica [%]	12	Calor total aportado [kW]	92
Eficiencia exergética [%]	23.6	Calor de evaporación [kW]	84
		Destilado [m ³ /día]	5.7
		Rel. Energía/destilado [MJ/m ³]	1200
		Potencia de eyección [kW]	4.1
		Potencia auto-consumida [kW]	4.34

Algunos puntos que se deben aclarar de acuerdo a las Figura 3.4 y 3.5 son:

- La eficiencia teórica térmica del ciclo PWG depende ampliamente de la presión de separación obtenida en la placa orificio. Esta se restringe por la presión atmosférica del sitio.
- En la potencia neta generada por el ciclo, aun no se contemplan los gastos en potencia para eyección en el condensador.

- El sistema MED-LE aquí analizado opera bajo las siguientes caídas de presión en relación con la atmosférica: 0.85 [bar] en primer efecto y 0.03 [bar] en segundo y tercer efecto. Tomando en cuenta la presión atm estándar de 1.01 [bar].
- El sistema MED-LE, está diseñado para operar con recurso geotérmico de baja entalpía, es decir fluido a una temperatura de 90 °C.

En la figura 3.4 se muestra el diagrama básico de un ciclo binario PWG antes del acoplamiento.

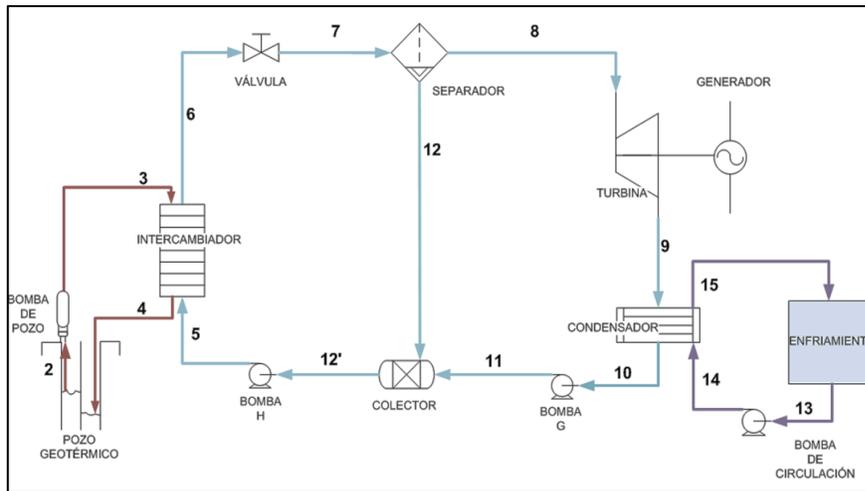


Figura 3.4.- Diagramas de flujo del ciclo PWG antes del acoplamiento

En la figura 3.5 se muestra el sistema de desalación MED-LE antes del acoplamiento.

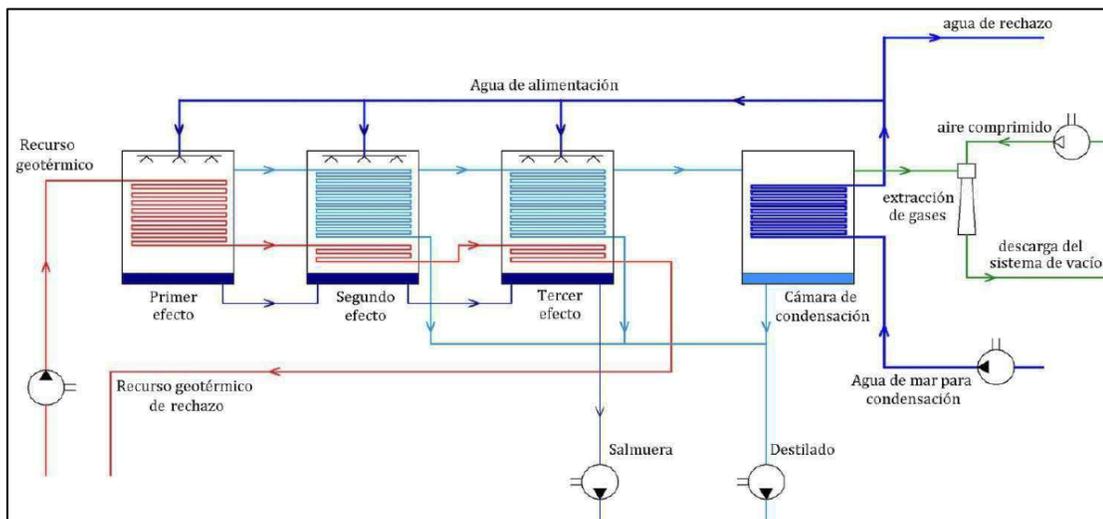


Figura 3.5.- Diagramas de flujo de los sistemas MED-LE antes del acoplamiento

Las cámaras se restringen a contener una salmuera de un máximo de 50000 ppm. Se deja fijo el gasto de fluido geotérmico. Los resultados obtenidos por el análisis energético de las propuestas se encuentran en la Tabla 3.5:

Tabla 3. 5.- Resultados del análisis energético de las propuestas de acoplamiento

	Variable	Propuesta I	Propuesta II	Propuesta III
Ciclo PWG	Flujo geotérmico [kg/s]	0.58	0.58	0.58
	Potencia en flecha PWG [kW]	9.8	9.7	5.2
	Eficiencia de Ciclo PWG [%]	12.1	4.8	4.8
	Eficiencia Exegética Ciclo [%]	23.6	23.4	12.5
Desaladora PWG	Eficiencia de Cogeneración [%]	----	62	63
	Flujo másico de fluido de aporte energético [kg/s]	0.58	0.55	0.29
	Flujo másico de agua de mar a cámara [kg/s]	0.096	0.086	0.170
	Calor neto aportado [kW]	131	117	175
	Calor útil de destilación [kW]	118	109	170
	Destilado [m ³ /día]	5.8	5.2	9.6
	Recuperación [%]	24.9	25.0	23.3
	Relación energética de desalación [MJ/m ³]	1604	1642	1395
	Potencia para eyección [kW]	4.1	4.1	4.1
	Trabajo de Eyección [kWh/m ³]	17.3	17.3	17.3
	Potencia de Bombas MED-LE [kW]	0.25	0.23	0.44
	Temperatura de salida del fluido geotérmico del proceso [°C]		53	56
Potencia neta residual [KW]		5.4	5.4	0.7
Observaciones		El fluido geotérmico residual del ciclo PWG tiene una temperatura (107 °C). Ligeramente mayor a la de un yacimiento de baja entalpía.	El fluido proveniente del ciclo tiene una temperatura de 104 °C. El intercambiador de calor de placas primario (PWG) incrementa su tamaño, a más del doble.	Se requiere de un intercambiador de placas secundario. El intercambiador primario incrementa su tamaño casi al doble.
		Ensuciamiento en incrustación interna y externa en los tubos de cada una de las cámaras desaladoras.	Se requiere una bomba con mayor potencia para suministrar el fluido a las cámaras MED-LE. Ensuciamiento externo en los tubos de las cámaras de desalación.	Mayor potencia de bombeo para el suministro de fluido geotérmico, al ciclo y a la MED-LE. Poca, casi nula la potencia residual para suministro eléctrico comunitario.

- La eficiencia de cogeneración en la propuesta I, no se evaluó ya que no tiene sentido, el fluido de aporte de energía es ajeno a la operación del ciclo PWG.
- La tercera propuesta prácticamente, será un ciclo cerrado de autoabastecimiento sin energía residual.
- Se consideró en todos los casos un solo eyector para mantener todas las cámaras en óptima operación, la presión mínima de vacío es de 10 kPa. Está en análisis una propuesta con eyectores en serie y separados para cada cámara, esto considera variaciones en el dimensionamiento de cada uno de los eyectores.
- La ventaja de la propuesta II, es que se evade la corrosión interna de los tubos en cada una de las cámaras, ya que no es fluido geotérmico el que viaja por dichos ductos.
- En todos los casos se consideró la concentración de sólidos en el agua de mar y su afectación durante la evaporación, es decir, se extrajo la cantidad de agua pura en el agua de mar, y los sólidos se analizaron por aparte en el análisis de salmuera.

Para la propuesta I, se presentan los siguientes gráficos que esquematizan la concentración de salmuera en el último efecto, y la cantidad de destilado en función del flujo de agua de mar suministrado a las cámaras.

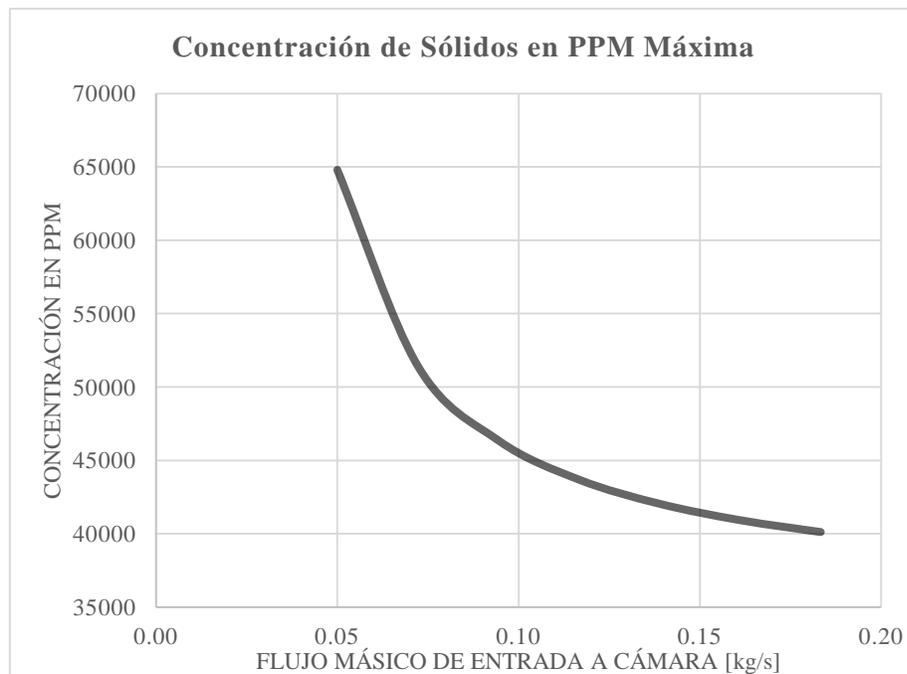


Figura 3. 6.- Concentración máxima de sólidos en la propuesta I

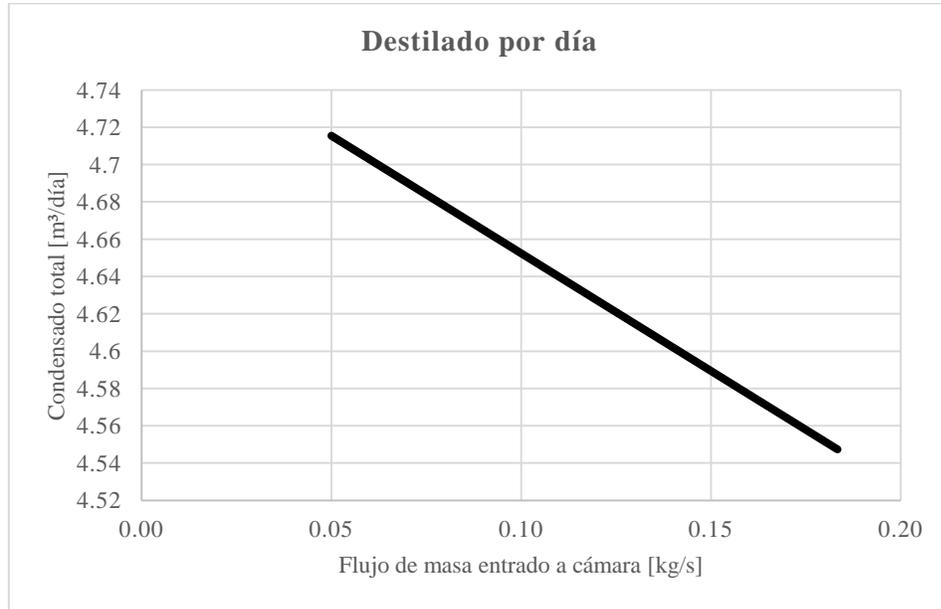


Figura 3. 7.- Destilado por día (producto) de la propuesta I

Para la propuesta II y III, se adicionan los siguientes gráficos sobre la evolución de algunos parámetros en función del decremento de temperaturas entre cada una de las cámaras.

PROPUESTA II

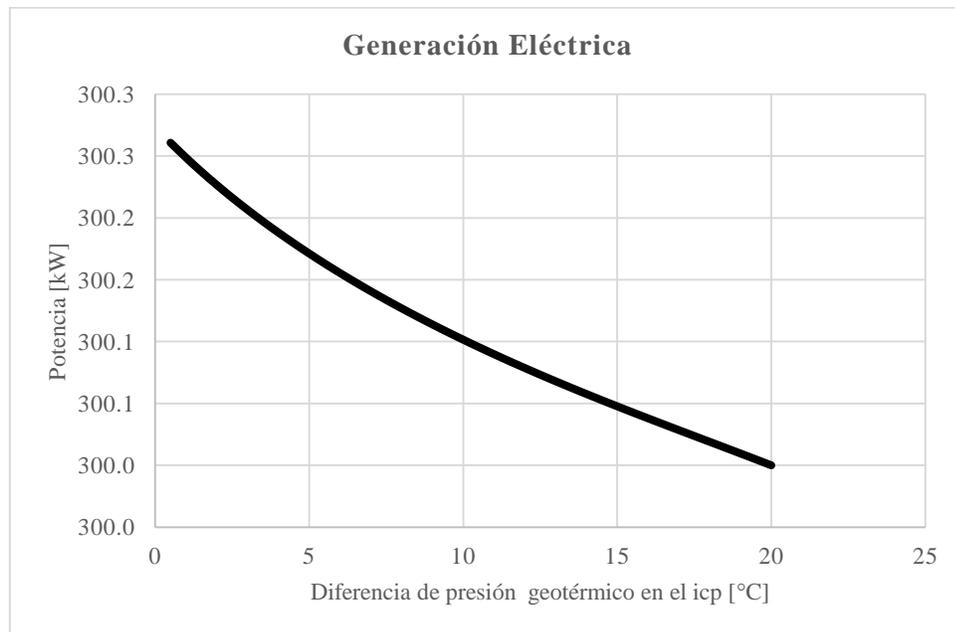


Figura 3. 8.- Generación eléctrica en la propuesta II.

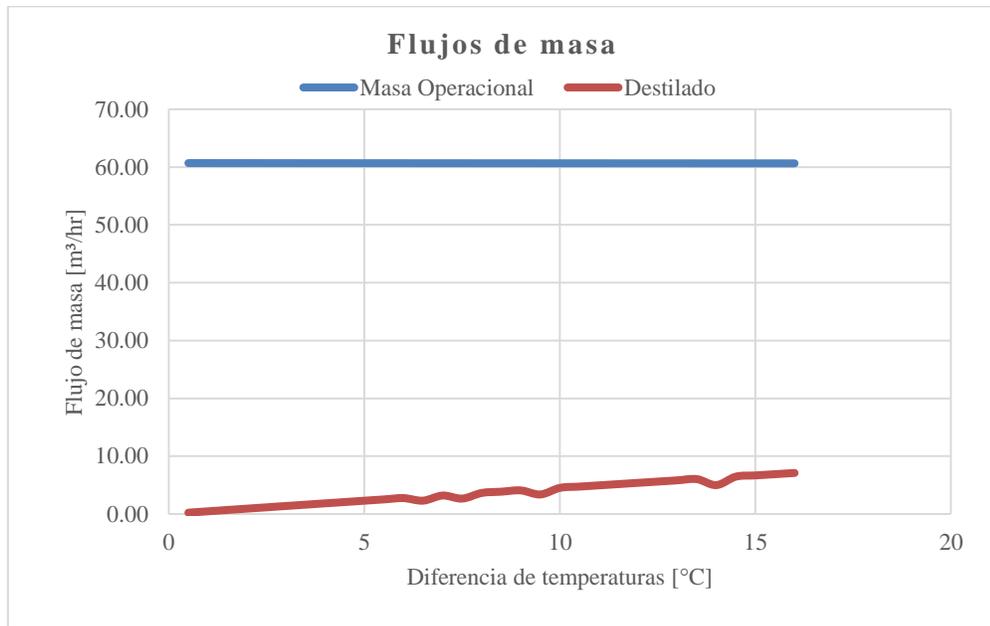


Figura 3. 9.- Gasto de masa operacional y de destilado de la propuesta II

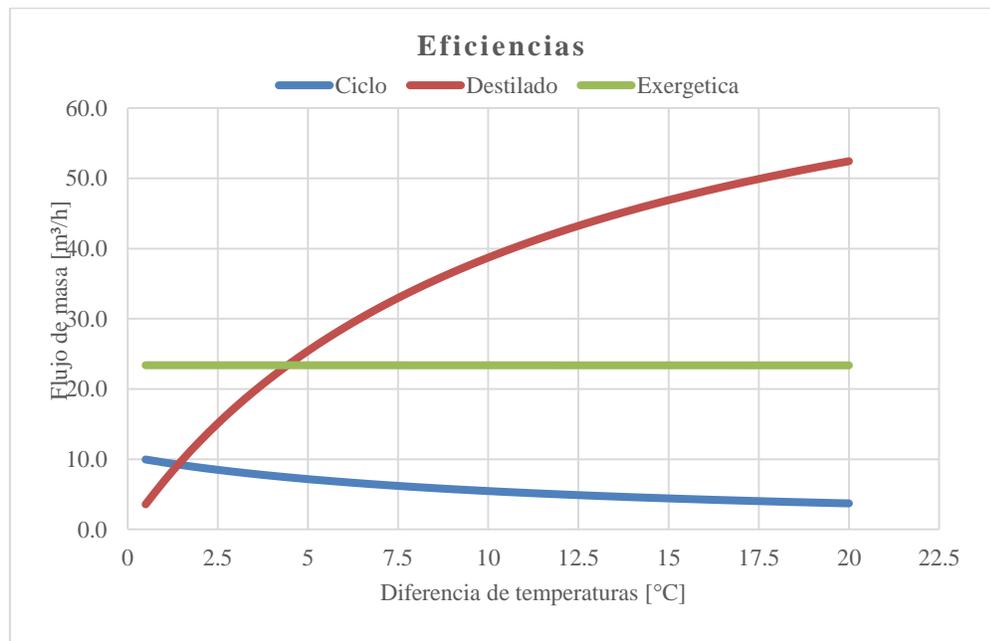


Figura 3. 10.- Eficiencias de la propuesta II

PROPUESTA III

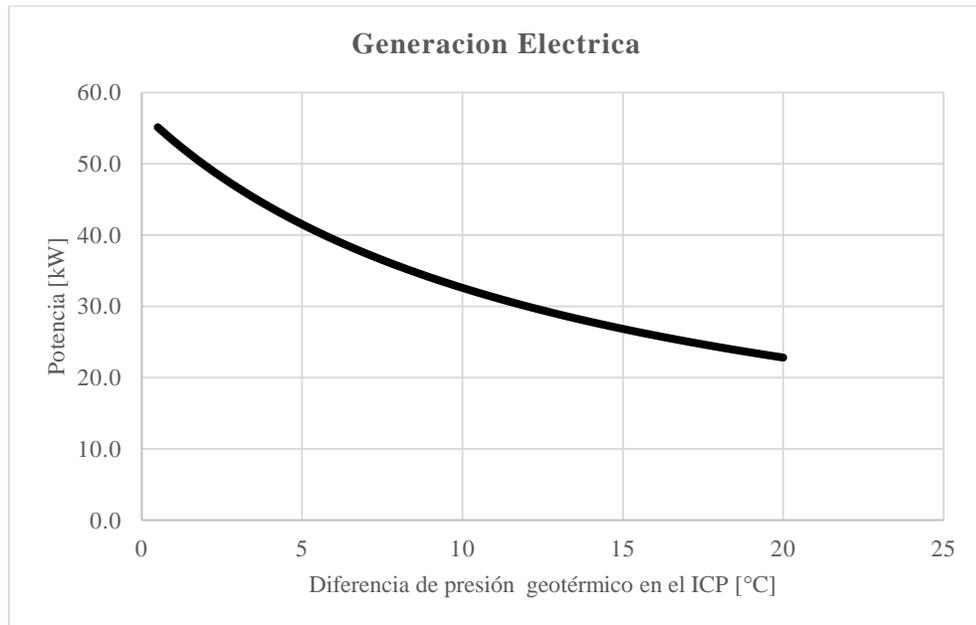


Figura 3. 11.- Generación eléctrica en la propuesta III

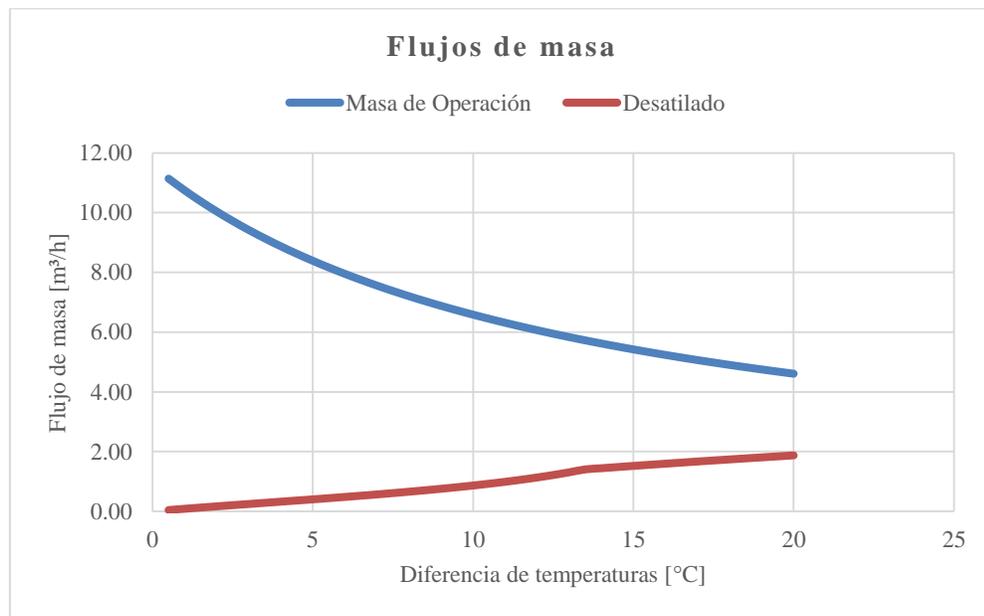


Figura 3. 12 Gasto de masa operacional y de destilado de la propuesta III

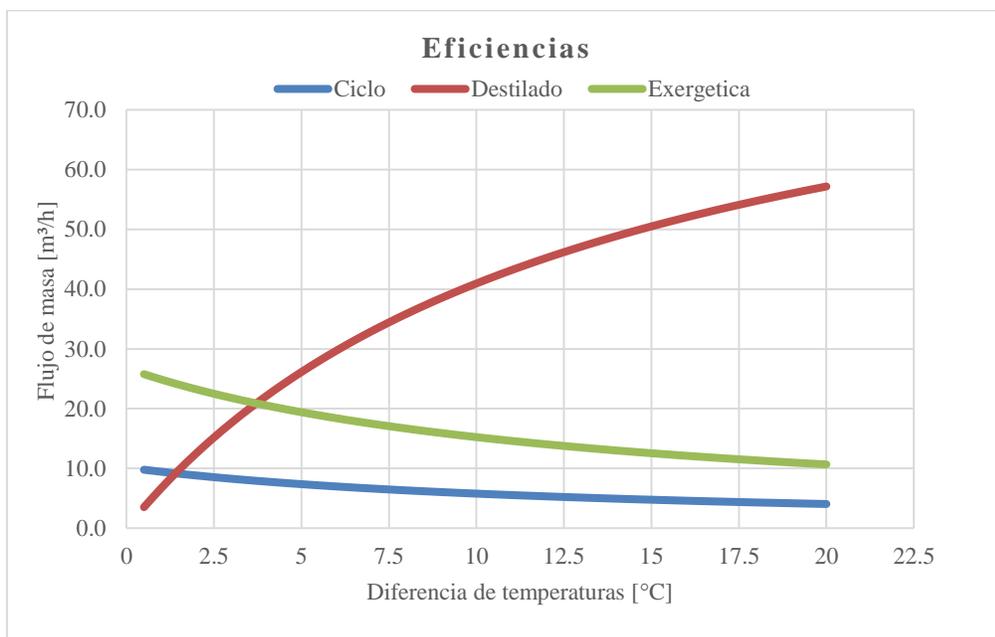


Figura 3. 13.-Eficiencias de la propuesta III

3.3.-COMPARATIVAS Y RESULTADOS SOBRE LA OPERATIVIDAD DEL SISTEMA DE ACOPLAMIENTO PWG- MED-LE CON EL PROGRAMA HYSYS ASPEN

A continuación se muestran los datos de la versión y la licencia del programa que se ocupó para realizar los cálculos.

Software: AspenHysys V8.8., AspenTech

System Name: SYS921096

Dongle Number: 921096

License Server: IINGEN-SWR03

3.3.1.- Definición de propuestas.

Para un análisis de diferentes configuraciones entre el acoplamiento del ciclo PWG, y la planta de desalación MED-LE, se ha realizado la comparativa entre tres propuestas tal como se presentan en la sección 3.1 en la cual se explican las tres configuraciones.

3.3.2.- Parámetros iniciales de propuestas.

Para el análisis, se proponen los siguientes parámetros iniciales para la simulación de cada una de las propuestas en HYSYS.

Tabla 3.6 Condiciones atmosféricas.

Temperatura de agua de mar	25	[°C]
Concentración de sólidos en agua de mar	35	[kg/m ³]
Presión atmosférica	1.013	[bar]

Tabla 3.7 Datos de los Equipos PWG

PWG	
Eficiencia bomba de pozo [%]	82
Eficiencia turbina [%]	85
Eficiencia intercambiador [%]	95
ΔP del intercambiador placas [bar]	0.5
Acercamiento de temp Inter [°C]	3
Eficiencia bomba G [%]	82
Eficiencia bomba H [%]	82
Eficiencia Bomba de circulación [%]	82
Eficiencia del Condensador [%]	85
Potencia generada [kW]	10

Tabla 3.8.-Datos de los Equipos MED-LE

MED-LE	
Efectos (cámaras)	3
Pinch de condensador [°C]	8
ΔT entre cámaras [°C]	17
Pinch de tubo en cámara [°C]	5
ΔP de cámaras [bar]	0.25
Flujo de agua a cada cámara [kg/s]	0.1333
Porcentaje de gases en volumen [%]	7.2%

3.3.3.- Ecuación de estado para simulación.

Dados, los parámetros iniciales para realizar la simulación, se procedió a dar los requerimientos al programa. Entre los más importantes, está la ecuación de estado utilizada por el software para que este pueda determinar cada una de las propiedades termodinámicas, según los estados correspondientes. La ecuación de estado utilizada es la de Redlich-Kwong, esta expresión fue desarrollada en 1949, y se adecua a las propiedades del agua.

$$\left(p + \frac{a}{V(V+b)T^{\frac{1}{2}}}\right)(V-b) = RT \begin{cases} a = 0.427480 \frac{R^2 T_c^{2.5}}{P_c} \\ b = 0.086640 \frac{RT_c}{P_c} \end{cases} \quad (\text{Ecu. 3.1})$$

$$V^3 - \left(\frac{RT}{p}\right)V^2 + \left(\frac{\frac{a}{T^{\frac{1}{2}}} - bRT - pb^2}{p}\right)V - \frac{ab}{pT^{\frac{1}{2}}} = 0 \quad (\text{Ecu. 3.2})$$

$$Z^3 - Z^2 + (A - B - B^2)Z - AB = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} A = \frac{ap}{R^2 T^{2.5}} = 0.427480 \frac{P_r}{T_r^{2.5}} \\ B = \frac{bp}{RT} = 0.086640 \frac{P_r}{T_r} \end{array} \right. \quad (\text{Ecu. 3.3})$$

3.3.4.- Simulaciones.

En la propuesta 1 y 2, el fluido geotérmico entra al sistema MED-LE con una temperatura de 90 °C, en la propuesta 3 al ser el fluido de trabajo del ciclo PWG el que se ingresa en la MED-LE se tiene que el fluido del ciclo entra al sistema desaladora 103 °C aproximadamente.

En la figura 3.15 se muestra el diagrama del ciclo PWG que se simuló en el HYSYS Aspen como base para las diferentes propuestas.

Para el ciclo PWG:

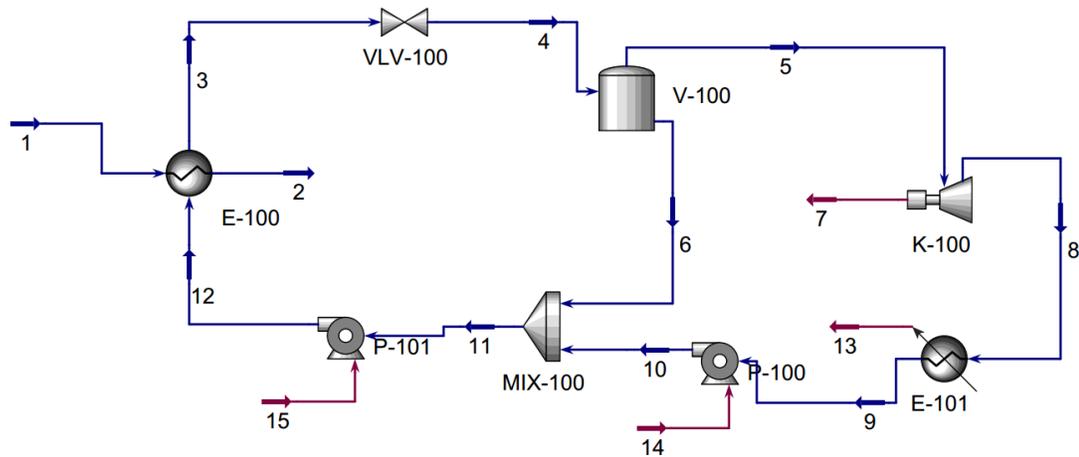


Figura 3. 14.- Diagrama del ciclo PWG en el HYSYS Aspen

Ya que se determinó la base del ciclo PWG se realizaron las simulaciones de las diferentes propuestas a continuación se muestran las configuraciones de cada una de las propuestas.

Para la propuesta 1, donde se utiliza el fluido geotérmico:

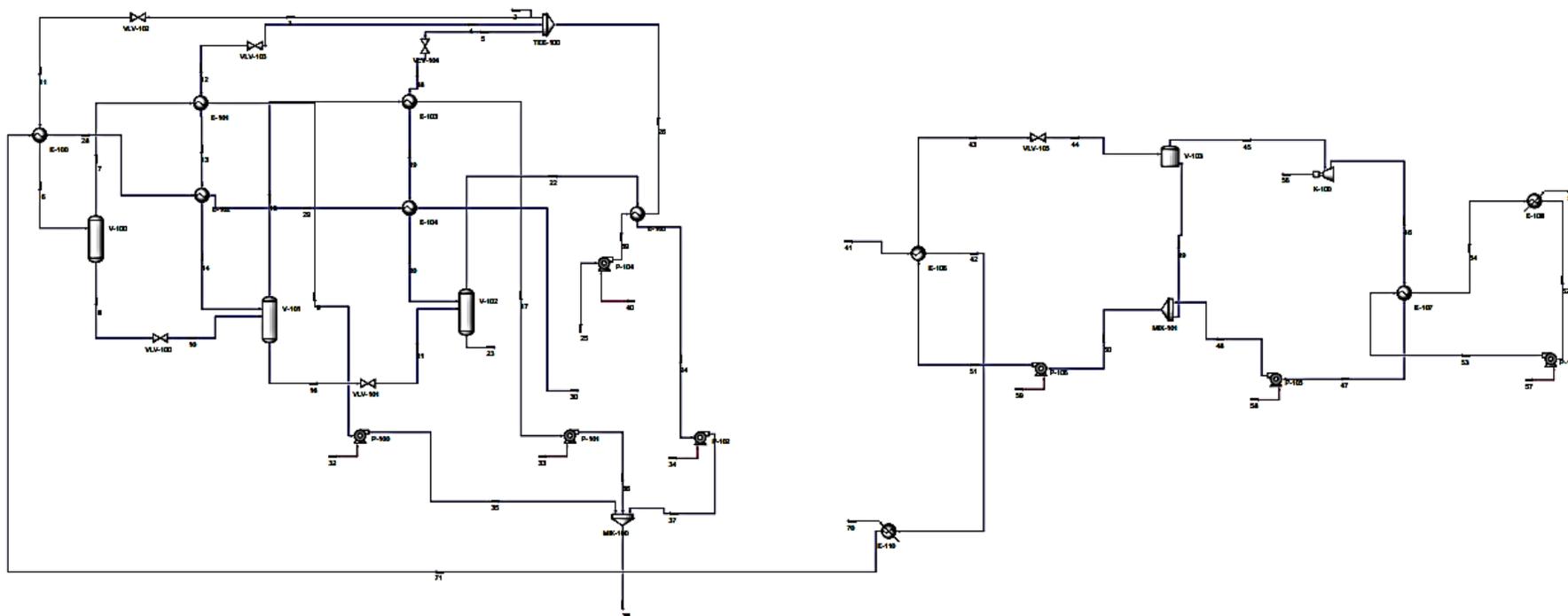


Figura 3. 15.-Diagrama de flujo de la propuesta I en HYSYS Aspen

Para la propuesta 2, donde se utiliza un intercambiador de calor de placas:

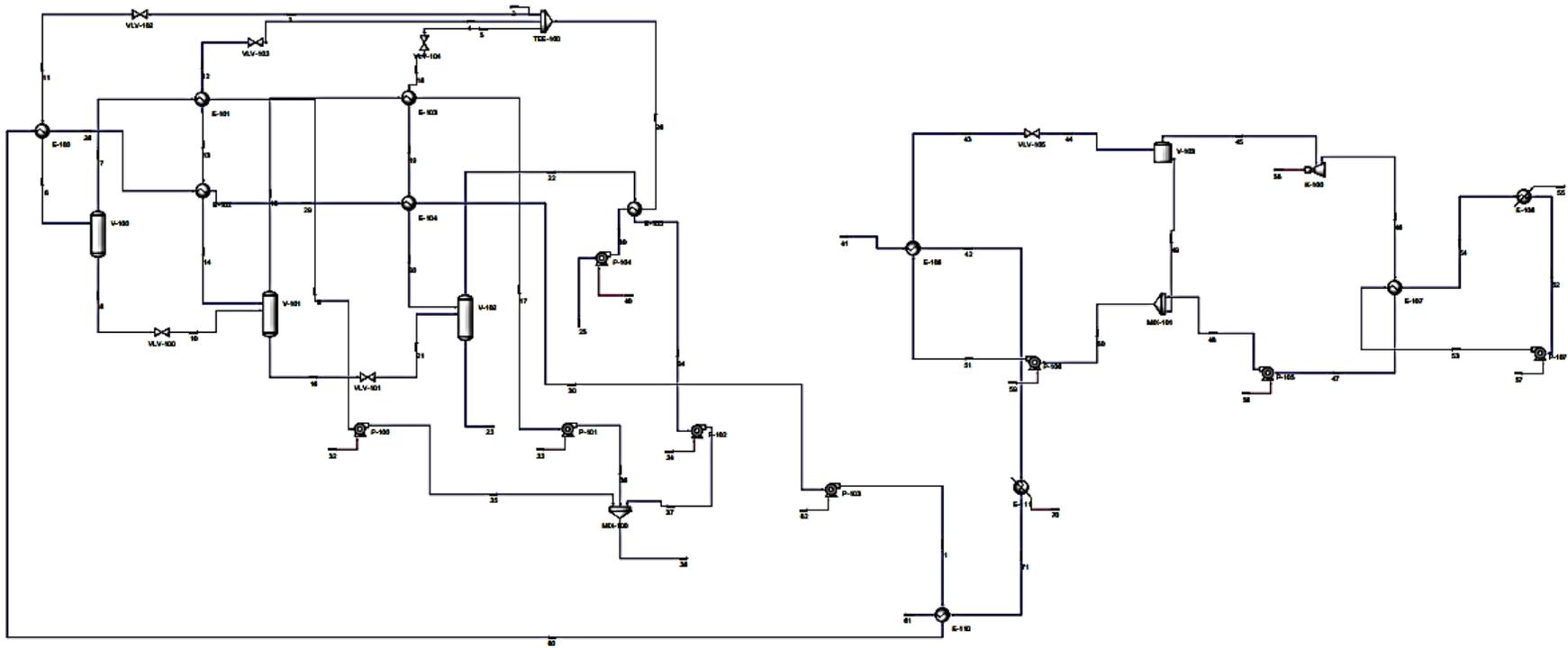


Figura 3. 16.-Diagrama de flujo de la propuesta II en HYSYS Aspen

Para la propuesta 3, donde se utiliza el fluido del ciclo:

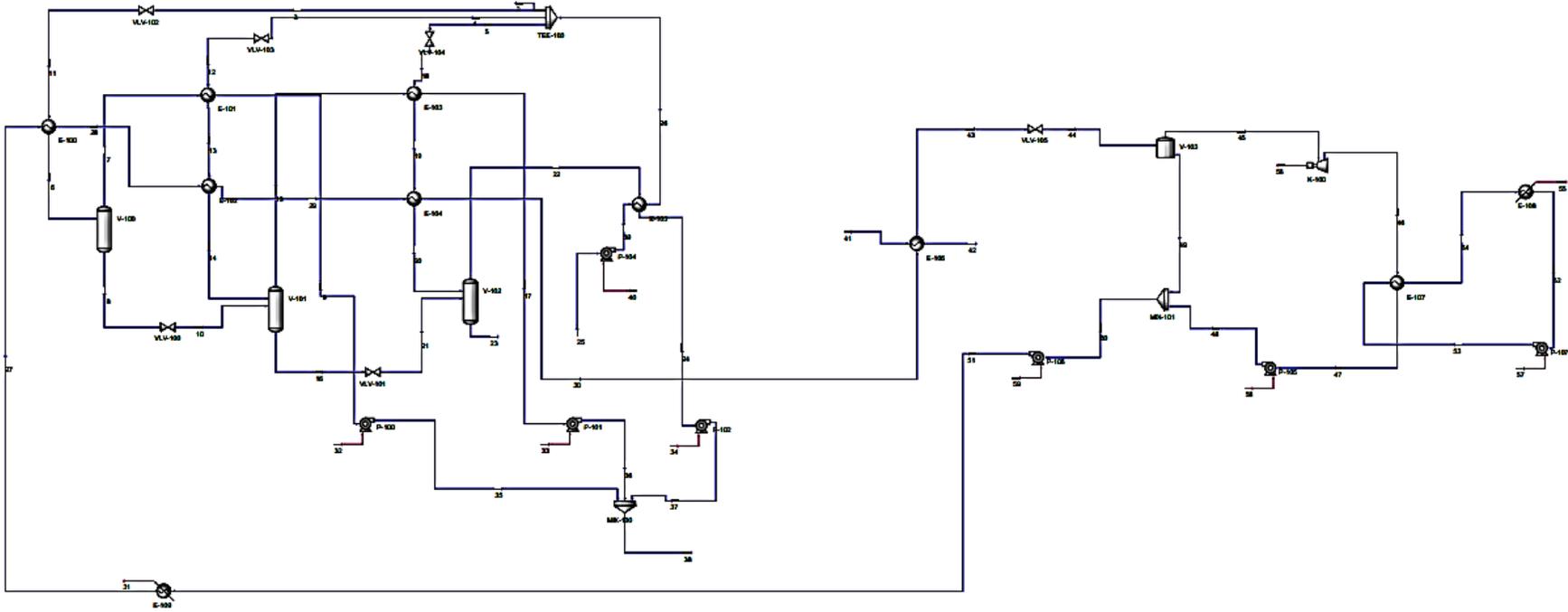


Figura 3. 17.- Diagrama de flujo de la propuesta III en HYSYS Aspen

3.3.5.- Resultados

Los más importantes, se presentan en las siguientes tablas:
Para PWG:

Tabla 3. 9.- Resultados relevantes obtenidos del ciclo PWG

Fluido Geotérmico		
Potencia generada	10.1	kW
Autoconsumo	0.38	kW
Potencia neta	9.72	kW
Eficiencia térmica	12.9	%
Flujo geotérmico	0.52	kg/s
Flujo agua ciclo	0.51	kg/s
Intercambiador		
Potencia generada	10.1	kW
Autoconsumo	0.36	kW
Potencia neta	9.74	kW
Eficiencia térmica	12.9	%
Flujo geotérmico	0.52	kg/s
Flujo agua ciclo	0.51	kg/s
Fluido del ciclo		
Potencia generada	10.1	kW
Autoconsumo	0.43	kW
Potencia neta	9.67	kW
Eficiencia cogeneración	34.1	%
Flujo geotérmico	0.52	kg/s
Flujo agua ciclo	0.51	kg/s

Para el sistema de desalación MED-LE:

Tabla 3. 10.- Resultados relevantes obtenidos de la desaladora MED-LE

Fluido Geotérmico		
Destilado por día	6.95	m ³ /día
FC en tercer cámara	1.2	
Gases incondensables	453.0	m ³ /día
Salmuera al día	28.5	m ³ /día
Porcentaje desalado	19.61	%
Potencia Bombas	0.066	kW
Rendimiento PR	1089	MJ/m ³
Energía para Evaporar	88	kW
Intercambiador		
Destilado por día	5.62	m ³ /día
FC en tercer cámara	1.2	
Gases incondensables	351.8	m ³ /día

Salmuera al día	29.8	m3/día
Porcentaje desalado	15.86	%
Potencia Bombas	0.138	kW
Rendimiento PR	1170	MJ/m3
Energía para Evaporar	76	kW
Fluido del ciclo		
Destilado por día	6.84	m3/día
FC en tercer cámara	1.2	
Gases Incondensables	428.2	m3/día
Salmuera al día	28.6	m3/día
Porcentaje desalado	19.31	%
Potencia Bombas	0.065	kW
Rendimiento PR	1092	MJ/m3
Energía para Evaporar	86	kW

A continuación se muestran las siguientes gráficas, que resaltan mejor las mejoras en el autoconsumo:

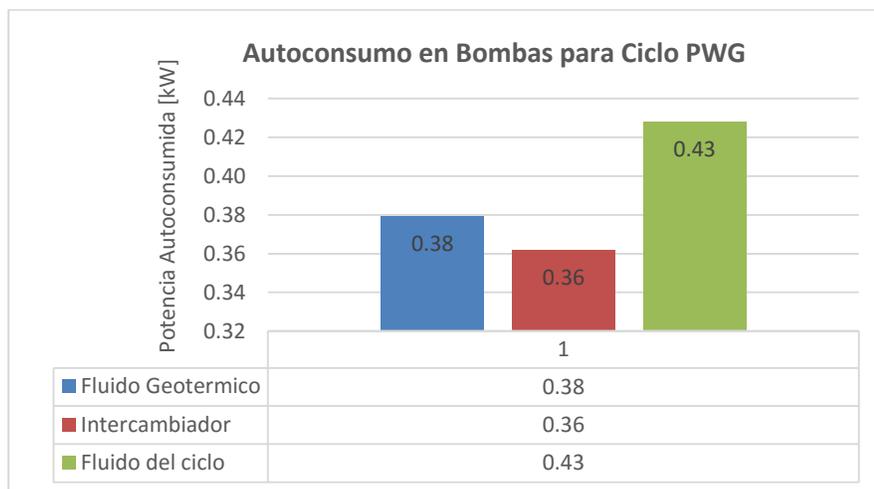


Figura 3. 18.- Grafica comparativa entre las propuestas del autoconsumo de las bombas para el ciclo PWG

Para el sistema de desalación, se presenta el destilado producto, porcentaje de destilado y el rendimiento térmico de cada una de las propuestas.

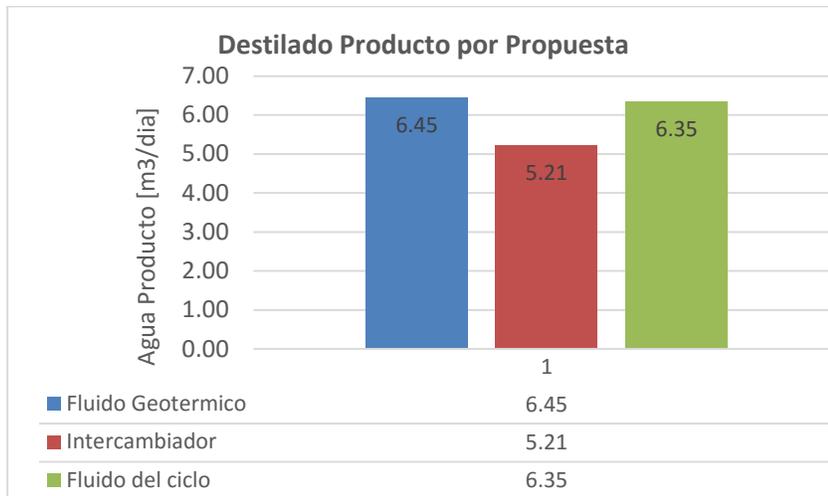


Figura 3. 19.- Grafica comparativa entre las propuestas del destilado del producto obtenido en el sistema MED-LE

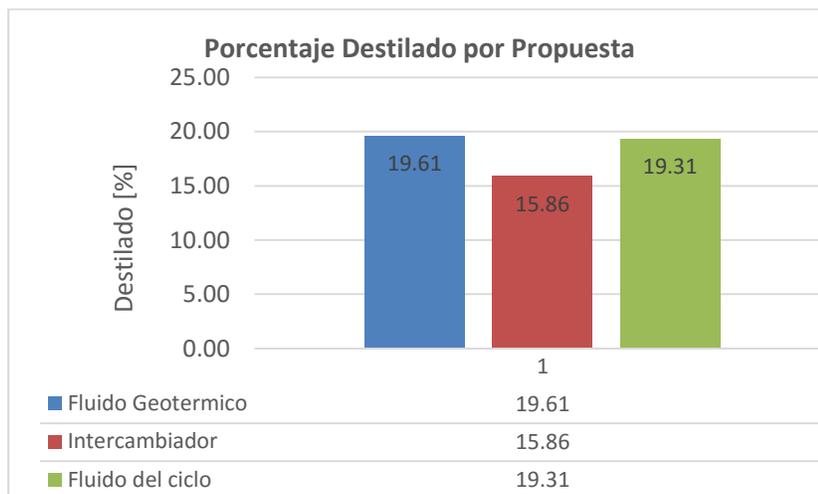


Figura 3. 20.- Grafica comparativa entre las propuestas del porcentaje de recuperación del sistema MED-LE

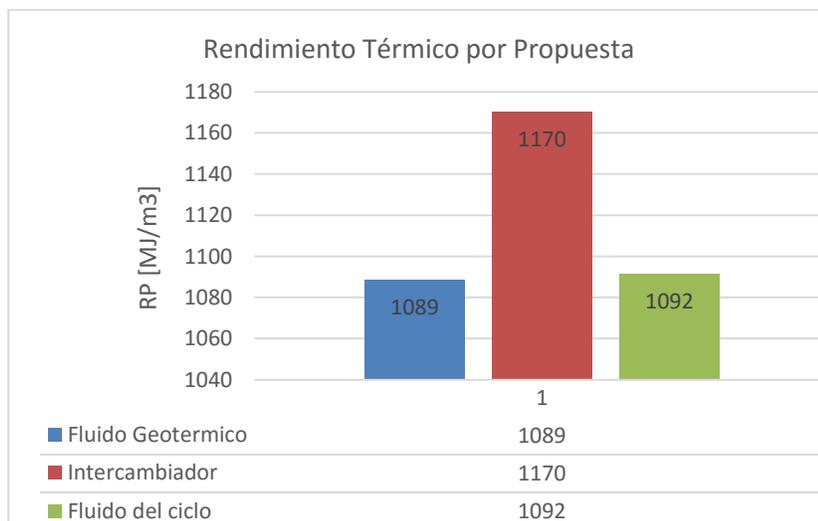


Figura 3. 21.-Grafica comparativa entre las propuestas del rendimiento térmico

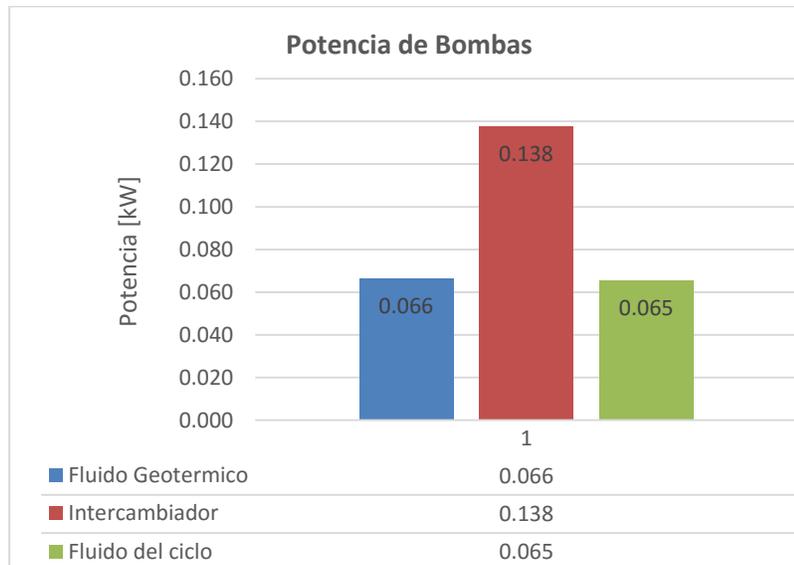


Figura 3. 22.- Grafica comparativa entre las propuestas de la potencia de las bombas.

3.4.- CONCLUSIONES

Para el ciclo PWG; sus estados termodinámicos prácticamente permanecen constantes, a excepción de la última propuesta, donde la eficiencia térmica es de un 2.4%, pero en esta configuración, es más propio hablar de una eficiencia de cogeneración, ya que el fluido geotérmico tiene doble propósito, el de generar energía eléctrica y el de aprovechar la energía térmica para la Desaladora MED-LE, dicha eficiencia es de 34.1%, respecto a la energía aportada por el fluido geotérmico en el intercambiador primario.

En cuanto al sistema MED-LE; en la propuesta I donde se pasa el fluido geotérmico por las cámaras, resulta con el mayor aprovechamiento térmico, y una mayor cantidad de destilado, pero se tiene el inconveniente del ensuciamiento y efectos adversos del fluido geotérmico dentro de los intercambiadores de calor lo cual puede ocasionar paros por mantenimiento e incrustaciones en el sistema MED-LE.

Al utilizar el fluido del ciclo en la propuesta III, se obtiene parámetros aceptables, muy cercanos a la propuesta I, desventaja, es la dependencia directa del fluido del ciclo en ambos sistemas, para ser más precisos el factor de planta y el factor de disponibilidad en ambos sistemas es muy dependiente.

La propuesta II donde se utiliza un intercambiador de calor de placas entre ambos sistemas, ofrece un porcentaje de desalación 19.1%, equivalente a 5.62 m³/día, un mayor consumo en potencia para bombas aproximadamente 72 Watts más, y un aprovechamiento térmico de 7.4% por debajo de la primer propuesta; pero se tienen ventajas adicionales, un menor ensuciamiento entre los efectos de la desaladora, y la operación independiente entre ambos sistemas.

4.- CONCLUSIONES GENERALES

- El uso de tecnologías energéticas renovables como la geotérmica, para la desalación de agua de mar y generación eléctrica, presenta en el mundo aplicaciones muy escasas, dado que se debe combinar una serie de factores como lo son; la existencia de potencial geotérmico disponible en el sitio, necesidades de agua potable que no puedan ser cubiertas en forma convencional en el sitio y fuentes de agua no potables disponibles en la zona. Estas circunstancias alrededor del mundo son muy escasas, en los desiertos se tendrían dos de estas pero no necesariamente el recurso geotérmico, en México se presenta esta circunstancia, por lo cual México tiene la posibilidad de estudiar, analizar, desarrollar y optimizar esta aplicación, como en muy pocas partes en el mundo.
- La Península de Baja California cumple con los requisitos para probar e instalar sistemas aislados de generación y desalación, Ensenada, Puertecitos, La Paz y Los Cabos son algunos ejemplos de estos sitios.
- Los resultados obtenidos en este estudio muestran que cuando se tienen temperaturas menores a los 140°C de recurso geotérmico, teniendo como temperatura ambiente 25°C, el CBM (PWG) presenta un mejor rendimiento que el CBC. Esto puede abrir nuevas áreas de oportunidad para la generación eléctrica con baja entalpía, no solo con geotermia sino que también con otras fuentes renovables
- El sistema MED-LE, tiene un menor porcentaje de recuperación de destilado por unidad de agua de mar suministrada, pero en general demuestra ser un sistema atractivo, ya que se obtiene mucho destilado con poca cantidad de energía térmica. Requiere mayor agua de alimentación.
- El sistema MED convencional, tiene una cantidad de destilado mucho menor que la MED-LE, debido al pinch (acercamiento) de los tubos en las cámaras, que para este caso fue de 5 [°C]. Esto impide extraer mucho calor al agua geotérmica, además los procesos de condensación-evaporación en las cámaras subsecuentes deben tener los 5 [°C] de diferencia, si no, el proceso no ocurre; esto último limita aún más las presiones de evaporación
- Para el ciclo PWG; sus estados termodinámicos prácticamente permanecen constantes, a excepción de la última propuesta, donde la eficiencia térmica es de un 2.4%, pero en esta configuración, es más propio hablar de una eficiencia de cogeneración, ya que el fluido geotérmico tiene doble propósito, el de generar energía eléctrica y el de aprovechar la energía térmica para la Desaladora MED-LE, dicha eficiencia está por arriba del 30%, respecto a la energía aportada por el fluido geotérmico en el intercambiador primario.
- En cuanto al sistema MED-LE; en la propuesta I donde se pasa el fluido geotérmico por las cámaras, resulta con el mayor aprovechamiento térmico, y una mayor cantidad de destilado, pero se tiene el inconveniente del ensuciamiento y efectos adversos del fluido geotérmico dentro de los intercambiadores de calor lo cual puede ocasionar paros por mantenimiento e incrustaciones en el sistema MED-LE.
- Al utilizar el fluido del ciclo en la propuesta III, se obtiene parámetros aceptables, muy cercanos a la propuesta I, desventaja, es la dependencia directa del fluido del ciclo en ambos sistemas, para ser más precisos el factor de planta y el factor de disponibilidad en ambos sistemas es muy dependiente. La propuesta II donde se utiliza un intercambiador de calor de placas entre ambos sistemas, ofrece un porcentaje de desalación 19.1%, equivalente a 5.62 m³/día, un mayor consumo en potencia para bombas aproximadamente 72 Watts más, y un aprovechamiento térmico de 7.4% por debajo de la primer propuesta; pero se tienen ventajas adicionales, un menor ensuciamiento entre los efectos de la desaladora, y la operación independiente entre ambos sistemas

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

1. Acwa Power Sasakura, 2016 <http://www.acwasasakura.com/>
2. Alcocer, S.M.; Hiriart, G. 2008. An applied research program on water desalination with renewable energies. *Am. J. Environ. Sci.* 4, 204–211.
3. Alessandro, F, Marco V. 2007. Optimal design of binary cycle power plants for water-dominated, medium-temperature geothermal fields. Dipartimento di Energetica “L. Poggi”. Università di Pisa.
4. Alfa Laval, 2007 <http://www.alfalaval.mx/>
5. AMTA (America's Authority in Membrane Treatment), Improving America's waters through membrane treatment and desalting, 2007 February Retrieved from, http://www.membranes-amta.org/amta_media/pdfs/8_WaterDesalinationProcesses.pdf.
6. Aviña H., Ramos O. y Hernández J. 2012. Propuesta del diseño analítico para una turbina experimental para micro-generación, XII Congreso y exposición latinoamericana de turbomaquinaria
7. Bertani, R., 2005. World Geothermal power generation in the period 2001-2005. *Geothermics* 34, 651-690.
8. C. Karytsas, D. Mendrinosa, D. Radoglou, 2004. The current geothermal exploration and development of the geothermal fields of Milos islands in Greece. *GHC Bull* 25, 17-21.
9. C.M. Wong, 1970. Geothermal Energy and Desalination: Partners in Progress. U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa Vol.2 Part1.
10. CFE <http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/> 2011
11. CFE www.cfe.gob.mx/ 2011
12. Comisión Federal de Electricidad CFE 2010
13. Comisión Nacional del Agua (CNA), Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), usos del agua <http://www.conagua.gob.mx/atlas/#> (2011)
14. D. Voivontas et al, 2001. A tool for the design of desalination plants powered by renewable energies. *Desalination* 133, 175-198.
15. Design Approach of Steam-Water Separators and Steam Dryers for Geothermal Applications, Ing. Armando Aceves. September 1984.
16. Dickson M. y Fanelli M, 2009. ¿Qué es la energía geotérmica?, Traducción al español por Alfredo Lashen, Universidad de Santiago de Chile.
17. DiPippo, R., 1999. Small geothermal power plants: design, performance and economics, *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin* 20 (2), 1-9.
18. DiPippo, R., 2004. Second Law assessment of binary plants generating power from low temperature geothermal fluids. *Geothermics* 33, 565-586.
19. DiPippo, R., 2008. *Geothermal power plants: Principles, applications, case studies and environmental impact*; 2nd edition. Butterworth-Heinemann, New York, NY, USA, 493 pp.
20. Djamila Adbeslame Dehmas, Nabila Kherba et al, 2011. On the use to power reverse osmosis desalination plant, A case study from Ténés (Algeria), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 956-963.
21. DME, German Desalination, Thermal Desalination of saline waters, DME Workshop, Enero 2009
22. E. Barbier, 2002. Geothermal energy technology and current status: an overview, *Renewable Sustain. Energy Rev.* 6, 3-65.
23. E. Mathiolakis, V. Belessiotis, E Delyannis, 2007. Desalination by using alternative energy: Review and state of the art, *Desalination* 203, 346-365.
24. E. Tzen and R. Morris, 2003. Renewable energy sources for desalination, *Solar energy*, 75(5) 375-379.
25. EGEC-European Geothermal Energy Council, 2001. Geothermal utilization for seawater desalination. Key issues 5: Innovative Application
26. Entingh, D. J., Easwaran, E. and McLARTY, L., 1994. Small geothermal electric systems for remote powering. U.S. DoE, Geothermal Division, Washington, D.C., 12 pp.

27. ESCWA (Economic and Social Commission for Western Asia), Role of Desalination in Addressing Water Scarcity 2009, 2009 November Retrieved from, <http://www.escwa.un.org/information/publications/edit/upload/sdpc-09-4.pdf>.
28. Fekraoui, A., and Kedaid, FZ.: Geothermal Resources and Uses in Algeria: A Country Update Report. Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
29. G.F. Leitner, 1998. Breaking the cost barrier for seawater desalting, Int. Desalination and Water Reuse Quart. 8(1) 15-20.
30. Galván C., Prol Ledesma R.M., Vera M.A., 2015. "Geothermal prospects in the Baja California Peninsula" *Geothermics*, Elsevier, N° 55, p. 39-57
31. Geothermal education office 2016 <http://geothermaleducation.org/>
32. Geothermal Energy Association, 2016 <http://www.geo-energy.org/Basics.aspx>
33. Glassley, William E., 2015. *Geothermal Energy. Renewable Energy and the Environment*; 2nd Edition, CRC Press. Taylor&Francis Group London 409 pp
34. Global Water Intelligence <http://www.globalwaterintel.com/> (2010)
35. Gnutek, Z., Bryszewska-Mazurek, A., 2001. The thermodynamic analysis of multicycle ORC engine. *Energy* 26, 1075-1082.
36. H. Aviña, M. Monzalvo (2008), Reporte de Trabajo, Exploración La Joya 1, Proyecto IMPULSA UNAM
37. H. Mahmoudi, Nawel Spahis, Mattheus F. Goosen, Noredine Ghaffour, Nadjib Drouiche, Abdellah Ouagued, 2010. Application of geothermal energy for heating and fresh water production in a brackish water greenhouse desalination unit: A case study from Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 512-517.
38. Hettiarachchi, H.D.M., Golubovic, M., Worek, W.M., Ikegami, Y., 2007. Optimum design criteria for an Organic Rankine Cycle using low-temperature geothermal heat sources. *Energy* 32 1698-1706.
39. Hiriart Gerardo 2011, Evaluación de la Energía Geotérmica en México, Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía. 107 pp
40. Hiriart, G., Gutiérrez-Négrin, L.C.A., 2003. Main aspects of geothermal energy in Mexico. *Geothermics* 32, 389-396.
41. Houcine, F. Benjemma, M.H. Chahbani, M. Maalej, 1999. Renewable energy sources for water desalting in Tunisia. *Desalination* 125, 123-132.
42. Houcine, F. Benjemma, M.H. Chahbani, M. Maalej, 1999. Renewable energy sources for water desalting in Tunisia. *Desalination* 125, 123-132.
43. Instituto de Investigaciones Eléctricas. (2010). Introducción a al Geotermia, Gerencia de Geotermia Recuperado de <http://www.iie.org.mx>
44. International Desalination Association www.idadesal.org/ (2009)
45. Ioannis C. Karagiannis, Petros G. Soldatos, 2008. Water desalination cost literature: Review and assessment, *Desalination* 223, 448-456.
46. James E. Miller, 2004. Review of water resource and desalination technologies, SAND 2003-0800
47. K.S. Spiegler and Y.M. El-Sayed 1994, A Desalination Primer, Balaban Desalination Publications, Santa Maria Imbaro, Italy
48. Kalogirou S. 2005. Seawater desalination using renewable energy sources. *Program Energy Combust Science* 31, 242-81.
49. Kanoglu, M., 2002. Exergy analysis of a dual-level binary geothermal power plant. *Geothermics* 31, 709-724.
50. Kaplan, U., 2007. Organic Rankine cycles configuration. In: Proceedings of the European Geothermal Congress 2007, 30 May-1 June, Unterhaching, Germany, 5 pp.
51. Kose, R., 2007. Geothermal energy potential for power generation in Turkey: A case study in Simav, Kutahya. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 497-511.
52. L. Awerbuch, T.E. Lindemuth, S.C. May, A.N. Rogers, 1976. Geothermal energy recovery process, *Desalination* 19, 325-336.

53. Llopis Trillo y Rodrigo Angulo, 2010. Guia de la energía geotérmica, Dirección General de Industria Energía y Minas Comunidad de Madrid España.
54. López Sánchez, A, Báncora Alsina, C, Prol Ledesma, RM, Hiriart, G (2006), A New Geothermal Resource in Los Cabos, Baja California Sur, Mexico
55. Lund Jhon, 2005. DIrect Heat Utilization of Geothermal Worldwide 2005. Geo-Heat Center Oregon Institute of Technology USA.
56. Macro Proyecto IMPULSA IV, Instituto de Ingeniería UNAM 2009.
57. Matteus Goosen, Hacene Mahmoudi, Noredine Ghaffour, 2010. Water Desalination Using Geothermal Energy. *Energies* 3, 1423-1442
58. MEDRC R&D Report, 2001. Matching Renewable Energy whit Desalination Plants, IT Power Ltd.
59. Mohamed A. Eltawil, Zhao Zhengming, Liqiang Yuan, 2009. A review of renewable energy technologies integrated whit desalination systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 2245-2262.
60. Moya, P., DiPippo, R., 2007. Unit 5 bottoming binary plant at Miravalles geothermal field, Costa Rica: Planning, design, performance and impact. *Geothermics* 36, 63-96.
61. O.A. Hamed, Overview of hybrid desalination systems (2005). Current status and future prospects, *Desalination* 186 (1–3) 207–214.
62. Ordaz M. A., Flores A. M. Ramírez S. G. 2011 “Potencial Geotérmico de la República Mexicana” Comisión federal de Electricidad Michoacán México
63. ORMAT <http://www.ormat.com/global-project>
64. Pablo, J. Tesis de licenciatura UNAM “Desalación de agua de mar con agua caliente utilizando procesos térmicos”, Ciudad Universitaria México, Abril 2009
65. Schochet, D.N., 1997. Performance of ORMAT geothermal binary and combined steam/binary cycle power plants with moderate and high temperature resources. *Renewable Energy* 10, 379-387.
66. Thomson Reuters Zawya 2016 <http://www.zawya.com/>
67. Toufic Mezher, Hassan Fath, Zeina Abbas, Arslan Khaled, 2010, Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies Masdar Institute of Science & Technology, PO Box 54224, Abu Dhabi, UAE
68. Veera Gnaneswar Gude, Nagamany Nirmalakhandan , Shuguang Deng, 2010. Renewable and sustainable approaches for desalination, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2641-2654.

NOMENCLATURA

- \dot{m}_{bd} Gasto másico de agua de rechazo o salmuera
- \dot{m}_d Gasto másico de agua destilada
- \dot{m}_d Gasto másico del agua destilada
- \dot{m}_{mu} Gasto másico de agua de la unidad desaladora (proceso)
- \dot{Q}_{sum} Calor suministrado (Energía Térmica)
- \dot{Q}_c Calor suministrado
- \dot{W}_B Potencia de la bomba
- \dot{W}_t Potencia teórica
- \dot{m}_{ar} Gasto másico de agua de refrigeración
- \dot{m}_{fg} Gasto másico del fluido geotérmico
- \dot{m}_{ft} Gasto másico del fluido de trabajo
- h_i Entalpía a las condiciones del fluido correspondiente
- h_i Entalpía a las condiciones del fluido correspondiente
- h_i Entalpía a las condiciones del fluido correspondiente
- h_i Entalpía a las condiciones del fluido correspondiente
- \dot{m}_3 Gasto másico de agua de mar por cámara
- \dot{m}_3 Gasto másico de agua de mar por cámara
- \dot{m}_3 Gasto másico de agua de mar por cámara
- \dot{m}_3 Gasto másico de agua de mar por cámara
- \dot{m}_{p1} Gasto másico de vapor a proceso
- \dot{m}_{p2} Gasto másico del vapor a proceso condensado
- \dot{m}_{s1} Gasto másico de salmuera uno
- \dot{m}_{s1} Gasto másico de salmuera uno
- \dot{m}_{s2} Gasto másico de salmuera dos
- \dot{m}_{s2} Gasto másico de salmuera dos
- \dot{m}_{s3} Gasto másico de salmuera tres
- \dot{m}_{s4} Gasto másico de salmuera cuatro
- \dot{m}_{v1} Gasto másico de vapor uno
- \dot{m}_{v1} Gasto másico de vapor uno
- \dot{m}_{v2} Gasto másico de vapor dos
- \dot{m}_{v2} Gasto másico de vapor dos
- \dot{m}_{v3} Gasto másico de vapor tres
- \dot{m}_{ve} Gasto másico de vapor al eyector
- \dot{m}_{vp} Gasto másico de vapor al precalentador de agua de mar
- S_{bd} Salinidad que contiene el agua de rechazo o salmuera
- S_d Salinidad que contiene el agua destilada
- S_{mu} Salinidad que contiene el agua para el proceso
- \bar{c} Calor específico
- \dot{m} Flujo de masa.
- η_B Eficiencia isoentrópica de la bomba
- η_t Eficiencia isoentrópica
- °C grados Celsius
- atm atmosferas
- BC Baja California
- BID Banco Interamericano de Desarrollo
- CFE Comisión Federal de Electricidad
- cm³ centímetros cúbicos
- CRE Comisión Reguladora de Energía
- g gramos
- GWh Giga Watts hora
- h entalpía
- iiDEA "Instituto de Ingeniería, Desalación y Energías Alternas"
- kg kilogramo
- km kilómetros
- kW kilo Watt
- m metros
- MED Multi Effect Distillation
- MED-LE "Multi Effect Distillation Low Enthalpy"
- MSF Multi Stage Flash
- MW Mega Watt
- MWe Mega Watts eléctricos
- MWh Mega Watts hora
- MWt Mega Watts térmicos
- P presión
- PR Relación de rendimiento
- PWG "Pressure Water Generation"
- RO Osmosis Inversa
- TJ Tera Joule
- U\$ Dolares
- x Calidad
- F Factor de gases.
- S Salinidad.

- dV Diferencial volumen.
- dA Diferencial de área.
- v Velocidad.
- .
- g Aceleración gravitacional.
- z Elevación, altura.
- ρ Densidad

ARTICULOS



Desalination and Water Treatment

www.deswater.com

doi: 10.1080/19443994.2016.1167626

(2016) 1–11



Alternatives for vacuum generation in unconventional seawater desalination systems

Héctor Miguel Aviña Jiménez^{a,*}, Gabriel León de los Santos^b, Daniel Saucedo Carbajal^c, Fernando García Torres^a, Miguel Ángel Benítez Torreblanca^a

^aGrupo iiDEA, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, Mexico, Tel. +52 55 5623 3500, ext. 1652; email: HAvinaJ@iingen.unam.mx (H.M. Aviña Jiménez), Tel. +52 55 5623 3500, ext. 1650; emails: GarciaFernando.T@gmail.com (F. García Torres), MBenitezT@iingen.unam.mx (M.Á. Benítez Torreblanca)

^bDivisión de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, Mexico, Tel. +52 55 5622 3035; email: tesgleon@yahoo.com

^cDivisión de Física Aplicada, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, Mexico, Tel. +52 646 175 0500, ext. 25322; email: dsauceda@cicese.mx

Received 15 October 2015; Accepted 15 March 2016

ABSTRACT

Seawater desalination is a viable option to reduce water shortage problems. As a consequence, the development of technologies that can guarantee the availability of water resources is essential. This article primarily focuses on the study and theoretical analysis of a vacuum generation system for a modular desalination unit with low-enthalpy geothermal energy as power source. This desalination unit, currently in the Research & Development stage, aims to be an effective, low-cost and marketable product, fulfilling the need of water in regions that have both, the energy source, and the lack of drinking water, such as north-western Mexico. Based on the dissertation presented, the use of a hydrojector is proposed, discussing the feasibility of the use of steam or air as working fluid.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
--

Comparison of the Energetic Performance of a Binary Cycle and a Flash Evaporation

Binary Cycle, Using Low-Enthalpy Geothermal Energy

Running head: Performance of Flash Evaporation Binary Cycle

Journal: International Journal of Sustainable Engineering

Héctor Miguel Aviña Jiménez¹ (Corresponding author); Gabriel León de los Santos²; Miguel

Ángel Benítez Torreblanca³

¹*iiDEA Group, Engineering Institute, National Autonomous University of Mexico, Mexico City,*

Mexico

²*Division of Electric Engineering, Faculty of Engineering, National Autonomous University of*

Mexico, Mexico City, Mexico

³*iiDEA Group, Engineering Institute, National Autonomous University of Mexico, Mexico City,*

Mexico

3.9-Aviña-México-1

CASCADE USE OF GEOTHERMAL ENERGY IN MEXICO

Héctor Miguel Aviña Jiménez ¹, Miguel Ángel Benítez Torreblanca¹, Eduardo Pérez González¹.

Abstract.

Geothermal cascade systems are widely used around the globe. Once the geothermal resource is used in a main application, like power generation, it is led to secondary processes in which the thermal energy can still be utilized. Examples of these secondary processes include refrigeration, desalination, dehydration, defrosting, climate control of greenhouses, and paper recycling, among others. One of the main advantages of cascade systems is that, in major power generation plants, is not uncommon to find available geothermal resources on the surface. In this article, the fundamentals of geothermal cascade systems are discussed, followed by with some geographical locations with geothermal potential in which cascade systems could be installed.

Desalination using Geothermal Energy¶

H. Aviña-Jiménez*, D. De la Rosa-Urbalejo, J. O. Rubalcaba-Velasco, A. García-Gutiérrez¶

iiDEA, Engineering Institute, National Autonomous University of México (UNAM)¶

Torre de Ingeniería 6º Nivel, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria 04510 Ciudad de México, México¶

*havinaj@iingen.unam.mx¶

Abstract¶

¶

A detailed analysis of the potential commissioning of seawater desalination technologies by using geothermal energy is presented in this work. The suitability of locations and their feasibility are also shown in order to install this technology.¶

Three main requirements must be combined in order to install seawater desalination technologies: a geothermal potential in the site, the necessity of fresh water under a shortage scenario, and the lack of drinking water sources in the surroundings, for instance the presence of seawater. Due to these constrains, few sites in the world offer these three requirements in which the use of renewable energy technologies for seawater desalination, such as geothermal energy, can be used. However, Mexico can deal with these constrains offering the possibility of studying, analyzing, developing and optimizing this application by covering all these requirements.¶

¶

Sites located in Baja California Peninsula such as Ensenada, Puertecitos, San Felipe, San Quintín, La Paz and Los Cabos satisfy all these requirements in order to test and install portable systems for electric generation and desalination.¶

Key words: low enthalpy, geothermal, direct use, desalination, alternative energy.¶

ANEXOS

ANEXO 1.-Hoja de cálculo del ciclo binario convencional

Punto	Recurso geotermico				Fluido de trabajo					Agua de enfriamiento		
	a	b	c	d	4	5	1	2	3	6	7	8
T (°C)	166.850	166.856	159.071	147.388	48.015	154.071	154.071	90.086	46.828	25	25.005	35.000
P(MPa)	0.734	0.784	0.734	0.734	2.100	2.050	2.000	0.187	0.187	0.1	0.15	0.05
Gasto(Kg/s)	98.466	98.466	98.466	98.466	16.849	16.849	16.849	16.849	16.849	174.422	174.422	174.422
Gasto(m3/s)	0.109	0.109	0.108	0.107	0.028	0.039	0.261	3.610	0.028	0.175	0.175	0.175
Densidad(Kg/m3)	900.649	900.673	908.434	919.595	594.190	435.348	64.479	4.668	592.069	997.047	997.068	994.011
Entalpia Liq(KJ/Kg)	705.310	705.365	671.513	621.101	48.719	343.324			44.533	104.919	104.9857561	146.674
Entalpia Gas(KJ/Kg)							531.263					
Entalpia Mezcla (KJ/Kg)								455.164				
Calidad(%)	0.000	-0.006	0.000	-0.041	-1.685	0.000	1.000	1.252	0.000	-1.0141E-09	-1.6269E-01	-7.8719E-10
Entrop Liq(KJ/Kg)	2.011	2.011	1.933	1.815	0.146	0.933			0.143	0.367199984	0.367256047	0.505114893
EntropGas(KJ/Kg)							1.373					
Entrop Mezcla (KJ/Kg)								1.410				
Carga Térmica(KW)	69449.041	3333.286		4963.846					6918.806			
Calor y trabajo KW	5.466				70.541	482.544	76.099	410.631	4.187	11.66		
						Qin	Wt	nc	Wn			

Datos de los Equipos	
Eficiencia bomba de pozo %	100
Eficiencia turbina %	85
Eficiencia intercambiador %	95
ΔP del intercambiador (bar)	0.5
Acercamiento de temp Inter°C	5
Eficiencia bomba G %	75
Eficiencia bomba H %	75
Eficiencia Bomba de circulación %	75
Eficiencia del Condensador %	90

Fluidos y Unidades	
Recurso geotermico	water
Fluido de Trabajo	isopentane
Fluido de enfriamiento	water
Unidades	C

	Potencia		Usos Propios kW
	Bruta KW	Neta KW	
Eficiencia Térmica %	1282.20	1200.00	82.20
14.90%			
Eficiencia Térmica %			Porcentaje usos Propios
11.038%			6.411118

ANEXO 2.-Hoja de cálculo del ciclo PWG

Punto	Recurso geotermico			Fluido de trabajo									Agua de enfriamiento			
	A	B	C	6	7	8	1	2	3	4	5	5'	9	10	11	
T (°C)	140.000	140.005	106.680	103.680	137.000	107.109	107.109	45.806	45.806	45.817	107.109	103.648	25	25.0035528	35	
P(MPa)	0.362	0.412	0.362	0.382	0.332	0.130	0.130	0.010	0.010	0.130	0.130	0.130	0.1	0.15	0.05	
Gasto(Kg/s)	64.908	64.908	64.908	65.028	65.028	65.028	3.694	3.6944748	3.694475	3.6944748	61.334	65.028	225.827	225.827	225.827	
Gasto(m3/s)	0.070	0.070	0.068	0.068	0.070	4.961	4.896	49.155	0.004	0.004	0.064	0.068	0.244	0.226	0.227	
Densidad(Kg/m3)	926.134	926.157	953.567	955.804	928.789	13.109	0.755	0.075	989.833	989.881	953.133	955.701	924.393	997.069	994.011	
Entalpia Liq(KJ/Kg)	589.162	589.216	447.543	434.894	576.305				2361.250	191.806	191.954	449.187	434.573	104.919	104.980	146.674
Entalpia Gas(KJ/Kg)								2686.644								
Entalpia Mezcla (KJ/Kg)						576.305		2361.250								
Calidad(%)	0.000				0.000	0.057	1.000	0.907	0.000		0.000	0.000				
Entrop Liq(KJ/Kg)	1.739	1.739	1.382	1.348	1.708	1.387	1.387	0.649	0.649	0.649	1.387	1.348	0.36719998			
EntropGas(KJ/Kg)						7.271	7.271									
Entrop Mezcla (KJ/Kg)						1.721		7.451								
Carga Térmica(KW)		9195.669							8014.957							9415.55014
Potencia Bomba(KW)	3.504	0.054		20.900	0.321	2251.749	325.394	1926.677	0.148	0.546			13.81	0.061		
		Wp3				Wp1	qin	Wt	qc	Wp2						

Datos de los Equipos	
Eficiencia bomba de pozo %	100
Eficiencia turbina %	85
Eficiencia intercambiador %	95
ΔP del intercambiador (bar)	0.5
Acercamiento de temp Inter°C	3
Eficiencia bomba G %	82
Eficiencia bomba H %	82
Eficiencia Bomba de circulación %	82
Eficiencia del Condensador %	85

Fluidos y Unidades	
Recurso geotermico	water
Fluido de Trabajo	water
Fluido de enfriamiento	water
Unidades	C

	Potencia	
	Bruta KW	Neta KW
Eficiencia termica %	1238.76	1200.00
13.04%		
Eficiencia del ciclo %	Usos Propios	
24.59%	kW	%
	38.76	3.129

ANEXO 3.- Hoja de cálculo de la MED-LE

Camara	Fluido Geotermico	Agua de mar	CAMARA 1				CAMARA 2				CAMARA 3				CONDENSADOR						
			G1	M1	V1	S1	G2	M2	V2	S2	C2	G3	M3	V3	S3	C3	Mb	M3	V3	CO	
Punto																					
Flujo Másico [kg/s]	0.56	0.340	0.56	0.113	0.024	0.090	0.560	0.113	0.02244	0.1808	0.020	0.560	0.113	0.029	0.2655	0.019	1.083	1.083	0.029	0.025	
Gasto [m³/hr]	2.1	1.228	2.0	0.411	819.2	0.328	2.0	0.411	927.3	0.7	701.2	2.0	0.411	1502.9	1.0	0.1	3.9	3.9	1502.9	0.1	
Presion [Mpa]	0.200	0.101	0.165	0.101	0.0156	0.016	0.130	0.101	0.012978	0.013	0.016	0.095	0.101	0.0100994	0.010	0.013	0.24	0.206	0.010	0.010	
Temperatura [°C]	85.0	25.0	58	38.0	54.8	54.8	54.0	38.0	51.0	51.0	54.8	49.0	38.0	46.0	46.0	51.0	25	38.00	46.0	46.0	
Densidad [kg/m³]	968.7	997.0	984.3	993.0	0.1036	985.8	986.2	993.0	0.0871	987.5	0.1	986.2	993.0	0.069	989.8	989.8	997.11	993.0	0.069	989.8	
Entalpia [kJ/kg]	356	105	242	159	2600	229	226	159	2593	214	229	205	159	2584	193	214	105	159	2584	193	
Calidad x energia, Fmasa				0.2079					0.1926					0.2394							
Calidad x flasheo, Fmasa									0.0067					0.0087							
Conctr. Salm [kgsol/kg]				0.035		0.045		0.035		0.044			0.035		0.045						
Factor de Concentracion am				1.263					1.255					1.282							
Factor de Concentracion total																					
Energia de aporte fluido	63.86			78.65	54.27	421.89	11.95	103.40	33.36	470.81	31.58				58.80						
ppm salmuera				35000		43867		35000		43669			35000		44709						

proceso	Recoleccion de Fluidos											
	Camara 1			Camara 2			Camara 3			Totales		
	Vapor	Salmuera	GNC	Vapor	Salmuera	GNC	Vapor	Salmuera	GNC	Condensado	Salmuera	GNC
Unidades												
[kg/s]	0.024	0.090	0.00340	0.022	0.091	0.00323	0.029	0.085	0.00414	0.064	0.265	0.011
[m³/hr]	819	0.3374	20	927	0.3417	19	1503	0.3181	25	0.2403	0.9972	65
[m³/dia]	18678	8	466	21143	8	444	34266	7	568	5.5	23	1479

Den Vap	0.5977
Den liq	958
Foperac	0.95

ANEXO 4.- Hoja de Cálculo para el ciclo PWG de 10 KW que sirvió de base para los cálculos de acoplamiento

Punto	Recurso geotermico			Fluido de trabajo										Agua de enfriamiento			Ambiente
	2	3	4	5	5'	6	7	8	9	10	11	12	12'	13	14	15	
T (°C)	140.0	140.0	50.5	103.7	47.5	137.0	107.1	107.1	45.8	45.8	45.8	107.1	103.6	25.0	25.0	35.0	27.0
P(MPa)	0.362	0.412	0.362	0.487	0.382	0.332	0.130	0.130	0.010	0.010	0.130	0.130	0.130	0.100	0.150	0.050	0.100
Flujo masico (Kg/s)	0.58	0.58	0.58	0.55	0.55	0.55	0.55	0.03	0.03	0.03	0.03	0.52	0.55	1.90	1.90	1.90	
Gasto(m³/s)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.042	0.041	0.414	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	
Densidad(Kg/m3)	926.1	926.2	987.9	955.8	989.3	928.8	13.1	0.8	0.1	989.8	989.9	953.1	955.7	916.2	997.1	994.0	1.1607
Entalpia Liq(KJ/Kg)	589.2	589.2	211.7	435.0	199.2	576.3	'----	'----	2361.3	191.8	192.0	449.2	434.6	104.9	105.0	146.7	----
Entalpia Gas(KJ/Kg)	'----	'----	'----	'----	'----	'----	'----	2687	'----	'----	'----	'----	'----	'----	'----	'----	113
Entalpia Mezcla (KJ/Kg)	'----	'----	'----	'----	'----	'----	576.305	'----	2361.250	'----	'----	'----	'----	'----	'----	'----	----
Calidad(%)	0.000	'----	'----	'----	'----	0.000	0.057	1.000	0.907	0.000	'----	0.000	0.000	'----	'----	'----	----
Entrop Liq(KJ/Kg)	1.739	1.739	0.710	1.348	0.671	1.708	1.387	1.387	0.649	0.649	0.649	1.387	1.348	0.3672	'----	'----	----
Entrop Gas(KJ/Kg)	'----	'----	'----	'----	'----	'----	7.271	7.271	'----	'----	'----	'----	'----	'----	'----	'----	0.395
Entrop Mezcla (KJ/Kg)	'----	'----	'----	'----	'----	'----	1.721	'----	7.451	'----	'----	'----	'----	'----	'----	'----	----
Carga Térmica(KW)	'----	217	'----	'----	'----	'----	'----	'----	'----	67	'----	'----	'----	'----	'----	79	----
Potencia Bomba(KW)	0.04	'----	'----	0.25	'----	'----	'----	'----	'----	'----	0.00	'----	'----	0.12	'----	'----	----

Emax Suminist	Efic Term Desalacio %	Efic Term Ciclo %
42	48.8%	4.5%

Efic Exerg Ciclo %
23.4%

Efic. Term de Cogen
53.3%

Potencia	
Bruta KW	Neta KW
10.1	9.7
Termica [kW]	
106.1	