



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARATIVA ENERGÉTICA DE SISTEMAS TÉRMICOS
DE DESALACIÓN CON ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA
ENTALPIA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

FERMÍN GARCÍA MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS:

M. I. HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ

Ciudad Universitaria, México D.F. Marzo de 2014





Universidad Nacional
Autónoma de México

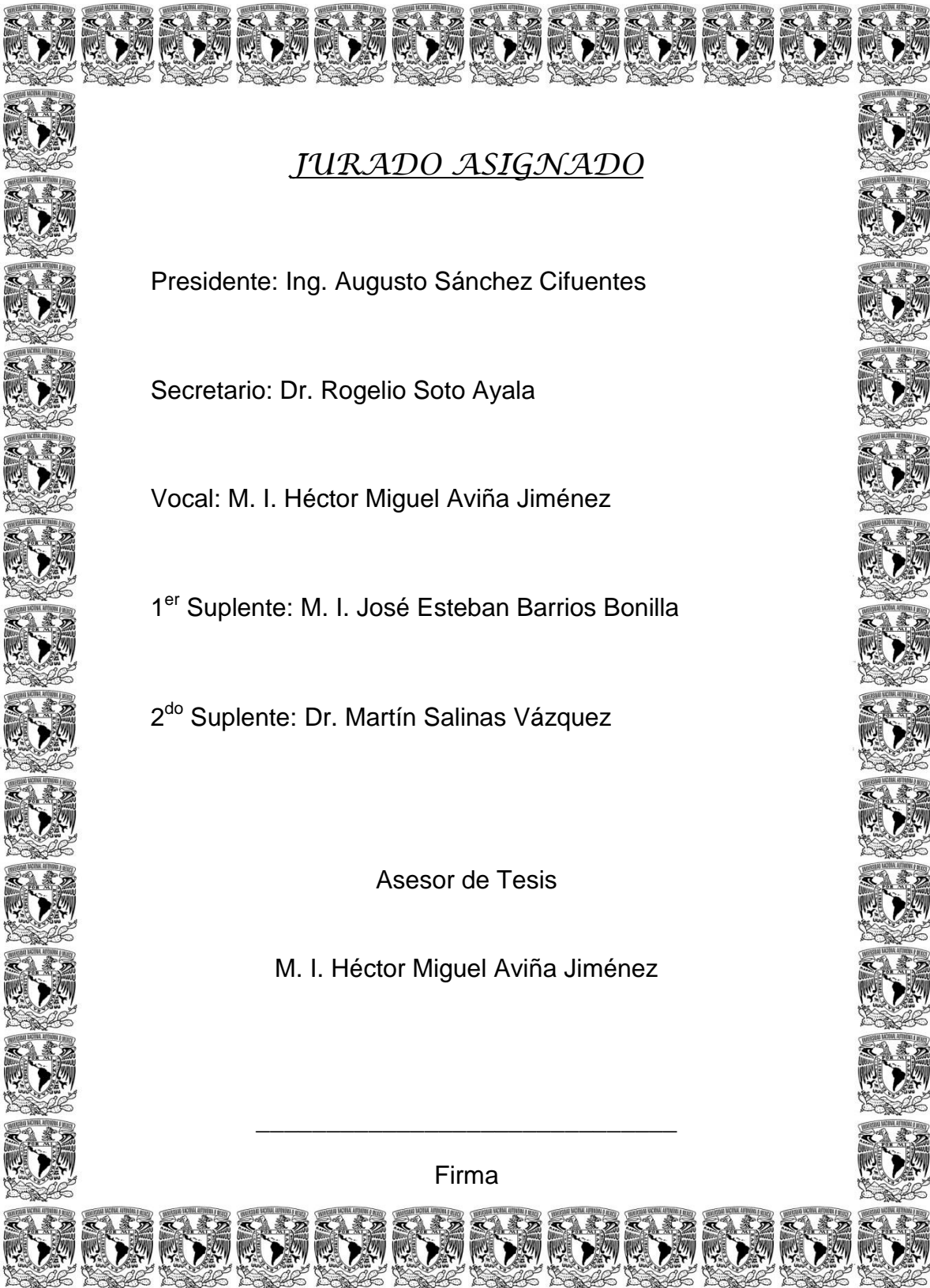


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



JURADO ASIGNADO

Presidente: Ing. Augusto Sánchez Cifuentes

Secretario: Dr. Rogelio Soto Ayala

Vocal: M. I. Héctor Miguel Aviña Jiménez

1^{er} Suplente: M. I. José Esteban Barrios Bonilla

2^{do} Suplente: Dr. Martín Salinas Vázquez

Asesor de Tesis

M. I. Héctor Miguel Aviña Jiménez

Firma

AGRADECIMIENTOS

No puedo pensar en alguien más importante para poner en primer lugar en estas líneas que a mis padres. A ustedes en especial les dedico y agradezco este logro, porque su amor, apoyo, confianza y sobre todo sacrificios hicieron posible que culminara esta etapa. No hay palabras que expresen la enorme gratitud que les tengo por todo lo que han hecho por mí, son unos verdaderos guerreros que día a día luchan por darle lo mejor a sus hijos y eso se los reconozco. Son mi ejemplo a seguir.

A la UNAM y Facultad de Ingeniería por darme la oportunidad de formar parte de su comunidad y concluir mis estudios. También les doy las gracias por el buen trabajo realizado en mi formación como Ingeniero y por facilitarme todo lo necesario para ello.

Al equipo de trabajo IIDEA por dejarme ser parte de ustedes y permitir que realizara este trabajo de tesis. Gracias Héctor por todo el apoyo que me diste al dirigir esta tesis, por la paciencia que tuviste conmigo y por ser más que un maestro, un amigo. De igual manera agradezco a Belem, Gasga, Mario, Fernando, Fabián, Maricela, Nuriban, Russell, Inti, Gabriel, Hugo, Jonathan, Víctor, Eduardo Martínez y Eduardo Pérez por todas las cosas que aprendí de ustedes, pero sobre todo por brindarme su amistad.

A los profesores que he tenido en todos mis años de estudiante y que han contribuido a mi formación académica y personal, su labor es admirable y digna de reconocer.

A mis amigos que he conocido a lo largo de mi vida y que han estado conmigo cuando los he necesitado. Gracias Ely, Ruth, Jorge, Ilse, Anayely y Neysi por todo su apoyo y por ofrecerme una amistad sincera.

A los miembros de mi familia que sí creyeron que podría finalizar mis estudios. En especial a mis hermanas Ingrid y Maira porque han tenido que padecer algunas carencias por mí.

A ti Elena por estar conmigo y acompañarme durante todo este proceso, por tolerar a un estudiante, por motivarme, pero principalmente por ser parte de mi vida.

A ustedes compañeros y amigos que conocí al entrar a la Facultad, durante el tiempo que estuve en ella y en el equipo de fútbol "Los Chachos", porque su amistad muchas veces me ayudó a no darme por vencido y seguir adelante.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| OBJETIVOS | 1 |
| RESUMEN | 2 |
| INTRODUCCIÓN | 4 |
| CAPÍTULO 1. TECNOLOGÍAS DE DESALACIÓN | 5 |
| 1.1 Antecedentes | 5 |
| 1.1.1 Definición | 6 |
| 1.1.2 Capacidad instalada a nivel mundial | 6 |
| 1.2 Sistemas térmicos de desalación | 9 |
| 1.2.1 Destilación instantánea de múltiple etapa (MSF) | 9 |
| 1.2.2 Destilación de múltiple efecto (MED) | 10 |
| 1.2.3 Destilación por compresión de vapor (VC) | 11 |
| 1.3 Sistemas de desalación con membranas | 12 |
| 1.3.1 Ósmosis inversa (RO) | 12 |
| 1.3.2 Electrodialisis (ED) | 13 |
| 1.4 Tecnologías de desalación instaladas en México | 14 |
| Conclusiones del capítulo 1 | 16 |
| CAPÍTULO 2. LA ENERGÍA GEOTÉRMICA | 17 |
| 2.1 Antecedentes | 17 |
| 2.2 Clasificación de los sistemas geotérmicos | 19 |
| 2.3 Historia de las aplicaciones de la geotermia | 22 |
| 2.4 Recursos geotérmicos y sus aplicaciones | 23 |
| 2.4.1 Recursos geotérmicos de alta entalpia y aplicaciones | 24 |
| 2.4.2 Recursos geotérmicos de media entalpia y aplicaciones | 25 |
| 2.4.3 Recursos geotérmicos de baja entalpia y aplicaciones | 26 |
| 2.5 La geotermia en México | 28 |
| 2.5.1 Historia de la generación geotermoeléctrica en México | 28 |
| 2.5.2 Usos directos de la Geotermia | 28 |
| 2.5.3 Generación de energía eléctrica | 29 |
| Conclusiones del capítulo 2 | 31 |

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 3. ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LOS SISTEMAS TÉRMICOS DE DESALACIÓN CONVENCIONALES | 32 |
| 3.1 Análisis del sistema MED..... | 32 |
| 3.1.1 Análisis térmico | 33 |
| 3.1.2 Análisis eléctrico..... | 38 |
| 3.1.3 Consideraciones y parámetros de funcionamiento | 38 |
| 3.2 Análisis del sistema MSF | 39 |
| 3.2.1 Análisis térmico | 40 |
| 3.2.2 Análisis eléctrico..... | 42 |
| 3.2.3 Consideraciones y parámetros de funcionamiento | 43 |
| 3.3 Análisis del sistema MVC..... | 44 |
| 3.3.1 Análisis térmico | 45 |
| 3.3.2 Análisis eléctrico..... | 48 |
| 3.3.3 Consideraciones y parámetros de funcionamiento | 49 |
| Conclusiones del capítulo 3..... | 51 |
| CAPÍTULO 4. ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LOS SISTEMAS TÉRMICOS DE DESALACIÓN UTILIZANDO RECURSO GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPIA | 52 |
| 4.1 Análisis del sistema MED con recurso geotérmico (MED-LE) | 52 |
| 4.1.1 Análisis térmico | 52 |
| 4.1.2 Análisis eléctrico..... | 56 |
| 4.1.3 Consideraciones y parámetros de funcionamiento | 57 |
| 4.2 Análisis del sistema MSF con recurso geotérmico | 57 |
| 4.2.1 Análisis térmico | 58 |
| 4.2.2 Análisis eléctrico..... | 60 |
| 4.2.3 Consideraciones y parámetros de funcionamiento | 60 |
| 4.3 Análisis del sistema MVC con recurso geotérmico | 61 |
| 4.3.1 Análisis térmico | 62 |
| 3.3.2 Análisis eléctrico..... | 63 |
| 4.3.3 Consideraciones y parámetros de funcionamiento | 64 |
| Conclusiones del capítulo 4..... | 66 |
| CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES | 67 |
| 5.1 Análisis de resultados..... | 67 |

| | |
|--|----|
| 5.2 Conclusiones Generales | 69 |
| ANEXOS | 71 |
| Anexo 1. Simulación en hoja de cálculo del sistema MED convencional..... | 71 |
| Anexo 2. Simulación en hoja de cálculo del sistema MSF convencional | 72 |
| Anexo 3. Simulación en hoja de cálculo del sistema MVC convencional..... | 73 |
| Anexo 4. Simulación en hoja de cálculo del sistema MED con geotermia (MED-LE)..... | 74 |
| Anexo 5. Simulación en hoja de cálculo del sistema MSF con geotermia | 75 |
| Anexo 6. Simulación en hoja de cálculo del sistema MVC con geotermia..... | 76 |
| GLOSARIO | 77 |
| NOMENCLATURA | 79 |
| REFERENCIAS..... | 81 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. 1 Distribución global del agua en el mundo [Estadísticas del agua en México, edición 2011. CONAGUA] | 5 |
| Figura 1. 2 Diagrama de una planta de desalación | 6 |
| Figura 1. 3 Crecimiento de la capacidad mundial de desalación de 1965-2011 [DesalData.com] | 7 |
| Figura 1. 4 Aumento anual en la capacidad instalada mundial de desalación [GWI DesalData]..... | 7 |
| Figura 1. 5 Evolución de las tecnologías de desalación a nivel mundial con respecto al tiempo [DesalData.com]..... | 8 |
| Figura 1. 6 Capacidad instalada mundial por tipo de tecnología. RO: Ósmosis inversa, MSF: Destilación instantánea de múltiple etapa, MED: Destilación de múltiple efecto [DesalData.com].. | 8 |
| Figura 1. 7 Diagrama del proceso de destilación MSF de 3 etapas..... | 10 |
| Figura 1. 8 Diagrama del proceso de destilación MED de 3 etapas | 11 |
| Figura 1. 9 Diagrama del proceso de destilación por compresión mecánica de vapor (MVC) [Artículo técnico 4, ecoagua.com] | 12 |
| Figura 1. 10 Diagrama del proceso de desalación por ósmosis inversa [drinking-water.org] | 13 |
| Figura 1. 11 Diagrama del proceso de desalación por electrodiálisis [Universidad Politécnica de Cataluña, upcommons.upc.edu] | 14 |
| Figura 2. 1 Capas que conforman la estructura de la Tierra. [Revista Digital Universitaria. Volumen 11. Número 10] | 18 |
| Figura 2. 2 Placas litosféricas, dorsales oceánicas, fosas oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos. Las flechas muestran la dirección del movimiento de las placas hacia las zonas de subducción. 1) Campos geotérmicos que producen electricidad; 2) Dorsales meso-oceánicas cruzadas por fallas transcurrentes (largas fracturas transversales); 3) Zona de subducción, donde la placa subducida se inclina hacia abajo y se funde en la astenosfera. [Dickson & Fanelli, 2004] | 19 |

| | |
|--|----|
| Figura 2. 3 Modelo esquemático de un sistema geotérmico hidrotermal. [Dickson & Fanelli, 2004] | 19 |
| Figura 2. 4 Modelo esquemático de un sistema geotérmico mejorado. [Dickson & Fanelli, 2004]. | 20 |
| Figura 2. 5 Máquina de generación de energía eléctrica mediante vapor geotérmico usada en Larderello en 1904, con su inventor, el Príncipe Piero Ginori Conti. [Dickson & Fanelli, 2004] | 22 |
| Figura 2. 6 Diagrama de las diferentes categorías de recursos geotérmicos (Muffler y Cataldi 1978). El eje vertical es el grado de factibilidad económica; el eje horizontal es el grado de certeza geológica. [Dickson & Fanelli, 2004] | 24 |
| Figura 2. 7 Esquema de una planta geotermoeléctrica de condensación. [Dickson & Fanelli, 2004] | 25 |
| Figura 2. 8 Esquema de una planta geotermal binaria. El flujo del fluido geotermal está en rojo, el fluido secundario en verde. [Dickson & Fanelli, 2004] | 26 |
| Figura 2. 9 Aplicación típica de sistema de bomba de calor [Dickson & Fanelli, 2004] | 27 |
| Figura 2. 10 Aplicaciones de los recursos geotérmicos con base en su temperatura [Dickson & Fanelli, 2004] | 28 |
| Figura 2. 11 Tipos de fuentes de energía y su porcentaje para la generación eléctrica en México. [Febrero 2013 CFE] | 29 |
| Figura 2. 12 Localización de campos geotérmicos de México actualmente en explotación, con potencial evaluado, el Cinturón Volcánico Mexicano y volcanes recientes o aún activos. | 30 |
| | |
| Figura 3. 1 Diagrama del sistema MED en la termoeléctrica de Tuxpan | 33 |
| Figura 3. 2 Esquema de la primera cámara del sistema MED | 34 |
| Figura 3. 3 Esquema de la segunda cámara del sistema MED | 35 |
| Figura 3. 4 Esquema de la tercera cámara del sistema MED | 35 |
| Figura 3. 5 Esquema de la cuarta cámara del sistema MED | 36 |
| Figura 3. 6 Esquema del precalentador de agua de mar | 37 |
| Figura 3. 7 Diagrama del sistema MSF en la termoeléctrica de Manzanillo | 40 |
| Figura 3. 8 Esquema del intercambiador de calor del sistema MSF | 41 |
| Figura 3. 9 Esquema de la primera cámara del sistema MSF | 41 |
| Figura 3. 10 Diagrama del sistema MVC en la termoeléctrica de Rosarito | 45 |
| Figura 3. 11 Esquema del evaporador del sistema MVC | 45 |
| Figura 3. 12 Esquema del precalentador con salmuera | 46 |
| Figura 3. 13 Esquema del precalentador con destilado | 47 |
| Figura 3. 14 Esquema del desgasificador | 47 |
| | |
| Figura 4. 1 Diagrama del sistema MED-LE | 52 |
| Figura 4. 2 Esquema de la primera cámara del sistema MED-LE | 53 |
| Figura 4. 3 Esquema de la segunda cámara del sistema MED-LE | 54 |
| Figura 4. 4 Esquema de la tercera cámara del sistema MED-LE | 55 |
| Figura 4. 5 Esquema del precalentador de agua de mar del sistema MED-LE | 55 |
| Figura 4. 6 Diagrama del sistema MSF con recurso geotérmico | 58 |
| Figura 4. 7 Esquema de la primera cámara del sistema MSF con recurso geotérmico | 59 |

Figura 4. 8 Diagrama del sistema MVC con recurso geotérmico 62
Figura 4. 9 Esquema del intercambiador de calor de placas..... 62

Figura 5. 1 Porcentaje de desalación en función de la temperatura del recurso geotérmico..... 67
Figura 5.2 Consumo eléctrico (CE) en función de la temperatura del recurso geotérmico..... 67
Figura 5. 3 Performance Ratio (PR) en función del recurso geotérmico..... 68
Figura 5. 4 Factor de concentración (FC) en función de la temperatura del recurso geotérmico.... 68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Inventario plantas desaladoras por estado, capacidad instalada y estado de operación [Fuentes Díaz y Ramírez González, 2002] 14
Tabla 1. 2 Plantas desaladoras por proceso y por estado [Fuentes Díaz y Ramírez González, 2002] 15

Tabla 3. 1 Comparación de resultados entre los sistemas de desalación convencionales 50

Tabla 4. 1 Comparación de resultados entre los sistemas de desalación con recurso geotérmico . 65

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Realizar un análisis energético de los sistemas térmicos de desalación MED, MSF y MVC, utilizando recurso geotérmico de baja entalpia como fuente principal de calor para conocer la mejor opción bajo ciertos parámetros.

OBJETIVOS PARTICULARES:

- Dar a conocer en términos generales las principales tecnologías de desalación y la geotermia, así como su situación a nivel mundial y en México.
- Determinar la factibilidad técnica al acoplar el recurso geotérmico de baja entalpia en los sistemas térmicos de desalación MED, MSF y MVC.
- Conocer el comportamiento de los parámetros PR (Performance Ratio), y CE (Consumo Eléctrico) al variar determinados datos iniciales.

RESUMEN

En las últimas décadas el incremento en la demanda energética, así como de agua potable han sido dos de los principales problemas que se presentan a nivel mundial, esto debido en gran medida al crecimiento tan acelerado de la población.

Nuestro país no está exento a esta problemática; la escases de agua es cada vez más evidente en diferentes zonas de México, cuyas causas pueden ser diversas como la sobreexplotación de los mantos acuíferos, la falta de lluvias de temporada, la deforestación en zonas de captación de agua pluvial, entre otras. Es por esto que dos terceras partes del territorio nacional se consideran zonas áridas o semiáridas.

Por otra parte, el crecimiento de la demanda energética que tiene el país conlleva a serios problemas ambientales, causados por la gran dependencia que aún se tiene de combustibles fósiles y que contribuyen a la formación de los llamados gases efecto invernadero.

Debido a lo mencionado con anterioridad, diversos países en todo el mundo han tomado medidas para resarcir el daño que se ha ocasionado al ambiente; una de las opciones es el uso de energías alternas como fuente de energía primaria, entre las que se encuentran la solar, eólica, geotérmica, biomasa, hídrica, mareomotriz, nuclear, entre otras. Algunas de estas tecnologías ya se utilizan con excelentes resultados, mientras que otras aún se encuentran en desarrollo. Cualquiera que sea su situación, es evidente que su mejora depende de la continuidad en la investigación, así como de tener los recursos necesarios para la implementación.

Al hablar de investigación en energías alternas, una referencia es el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, donde se encuentra el grupo de trabajo IIDEA (Instituto de Ingeniería Desalación y Energías Alternas) que surge a partir del programa IMPULSA IV “Desalación de Agua de Mar con Energías Renovables” creado en el año 2005 y que tenía varias líneas de investigaciones sobre el aprovechamiento en el país de recursos naturales, como el sol, mareas, corrientes marinas, ventilas submarinas, geotermia y viento.

Dentro de los proyectos que actualmente realiza IIDEA, se tienen dos que surgieron en IMPULSA IV y que están enfocados al aprovechamiento de la energía geotérmica de baja y media entalpía, que es un recurso abundante en ciertas partes del país y que casi en su totalidad solo se utiliza para fines recreativos. Uno de los proyectos es el desarrollo del ciclo PWG (Pressure Water Generation), que es una variante de un ciclo de generación de energía eléctrica tipo binario, cuyos elementos característicos son un intercambiador de calor de placas y el uso de agua como fluido de trabajo. El otro proyecto que se lleva a cabo es el análisis y construcción del sistema MED-LE (Multiple Effect Distillation – Low Enthalpy), que es un método térmico de desalación de agua de mar utilizando energía geotérmica de baja entalpía como fuente principal de calor.

Es así, que este trabajo de tesis surge dentro del grupo de trabajo IIDEA y contribuye a conocer en términos generales la factibilidad técnica de emplear el recurso geotérmico de baja entalpía en otros tipos de sistemas térmicos de desalación a parte del MED-LE.

Los resultados obtenidos del análisis de los tres sistemas térmicos de desalación con energía geotérmica muestran que la compresión mecánica de vapor (MVC) da la mayor cantidad de destilado, pero conlleva a un elevado Factor de Concentración que puede provocar serios problemas de incrustaciones y afectar al proceso, así mismo, también presenta un consumo eléctrico significativo en comparación con los otros dos. Con respecto al sistema MSF, presenta un Factor de Concentración aceptable, de igual forma que su consumo eléctrico, sin embargo el porcentaje de desalación es el menor de los tres. Por último, el MED-LE tiene un porcentaje de desalación muy por debajo del MVC, pero en comparación con el MSF, es prácticamente el doble, su Factor de Concentración es admisible y su consumo eléctrico es el más bajo de todos.

Con lo anteriormente descrito y considerando que dentro de las prioridades en los procesos, están obtener la mayor producción de destilado y el ahorro de energía, en este caso eléctrica, la opción más viable técnicamente es el sistema MED-LE.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo principal analizar y comparar los procesos térmicos de desalación usando geotermia de baja entalpia como fuente principal de energía térmica, para determinar cuál tecnología es más adecuada bajo ciertas condiciones.

Para comprender de una mejor manera la importancia de este trabajo, se destinan los primeros dos capítulos para que el lector se familiarice con el tema en estudio. En el capítulo 1 se da a conocer qué es un proceso de desalación, las principales tecnologías utilizadas a nivel mundial, así como información estadística que se considera relevante. En el último apartado se presenta información obtenida en la literatura sobre la desalación a nivel nacional.

En el capítulo 2 se aborda el tema de la geotermia, su origen, las manifestaciones superficiales, de igual forma se proporciona la clasificación que diferentes autores le han dado en función de su temperatura y que esto ayuda a poder determinar el uso que se le puede dar. Como parte final del capítulo, se menciona la situación de la geotermia en México, el potencial que tiene y las aplicaciones que actualmente se le da.

Después del marco teórico presentado en los primeros dos capítulos, en el capítulo 3 se presentan tres casos de estudio de plantas térmicas desaladoras en México, esto con la finalidad de conocer su principio de funcionamiento y los elementos que la forman; cabe mencionar que la información utilizada para realizar los análisis energéticos fue obtenida por el proyecto IMPULSA IV en diferentes visitas que realizaron a Centrales Termoeléctricas en el país. Para el sistema MED se tomaron datos de una planta en Tuxpan, Veracruz, para la MSF la información era de otra en Manzanillo, Colima y en el caso de la MVC los datos eran de otra en Rosarito, Baja California. Para cada sistema se hace un análisis térmico y eléctrico, con respecto a la parte térmica, se detalla los balances de masa y energía con sus respectivas ecuaciones fundamentales.

Una vez que se conocen las características de operación de las tecnologías térmicas de desalación, en el capítulo 4 se realiza la implementación de la geotermia en los tres diferentes tipos de sistemas, para esto se hacen distintas consideraciones que se presentan a detalle en cada caso de estudio, así mismo, se efectúan los análisis térmicos y eléctricos correspondientes; todos los resultados obtenidos se pueden observar con mayor claridad en el apartado de ANEXOS al final de este documento.

En el capítulo 5 se presenta primeramente las gráficas que muestran el comportamiento de los parámetros más importantes de los sistemas analizados, como son el Consumo Eléctrico, el PR, el Factor de Concentración y el porcentaje de desalación, al variar la temperatura del recurso geotérmico. En seguida se presentan las conclusiones generales con base en los resultados obtenidos de la simulación de los tres sistemas estudiados.

CAPÍTULO 1. TECNOLOGÍAS DE DESALACIÓN

En el presente capítulo se da un panorama general de qué es la desalación, se menciona los principales métodos utilizados a nivel mundial y se describe brevemente el principio de funcionamiento, de igual manera se muestran algunos datos estadísticos para conocer la situación actual que presentan las tecnologías de desalación.

Para finalizar, se menciona la situación de los recursos hídricos en México y se presentan datos estadísticos recabados en la literatura sobre los Estados en nuestro país que cuentan con plantas desaladoras y el tipo de tecnología que utilizan.

1.1 Antecedentes

El agua es uno de los elementos más indispensables para los seres vivos. Actualmente en el mundo se cuenta con una gran cantidad de agua, sin embargo, solo el 2.5%, lo que equivale a 35 millones de km³, es agua dulce. De esta cantidad, aproximadamente el 70% no está disponible para consumo humano debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo. Mientras que el 30% restante, prácticamente toda es subterránea. En base a esto, se puede decir que los seres vivos solo tienen acceso a menos del 1% del agua dulce que se encuentra en el planeta.¹

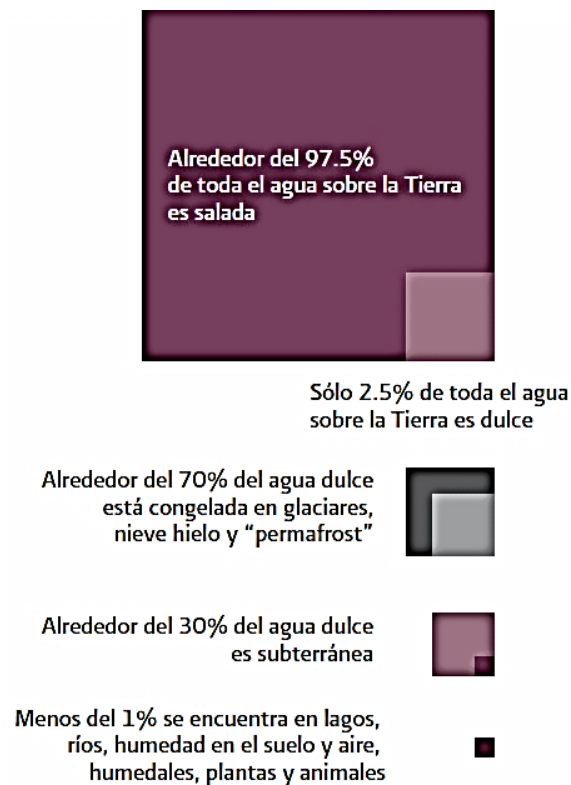


Figura 1. 1 Distribución global del agua en el mundo [Estadísticas del agua en México, edición 2011. CONAGUA]

Aunado al limitado acceso de agua dulce, se tiene otro grave problema, el cual es la sobrepoblación en el mundo. A mediados del siglo XX se tenía una población de 2,529 millones de personas, mientras que para 2010, aumentó a 6,909 millones. Así mismo, se estima que para el año 2050, la población mundial sea de 9,150 millones.

¹ Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Estadísticas del agua en México, edición 2011. México D. F., Marzo 2011

La problemática anteriormente mencionada es un indicio de que se tiene que tomar acciones para el abasto de agua potable a una población creciente. Es por eso, que una solución a dicho problema es la desalación de agua de mar, ya que se encuentra en abundantes cantidades en el planeta.

En el mundo son muchos los países que padecen la escasez de agua dulce, principalmente en el Medio Oriente, es por eso que usan tecnologías de desalación para obtener a partir del agua de mar, agua para satisfacer las necesidades de su población.

1.1.1 Definición

La desalación es un proceso que separa las sales y minerales que se encuentran en un flujo de agua de alimentación y se obtienen dos corrientes de salida, una de éstas es el producto, el cual se caracteriza por una baja salinidad y la otra corriente es la salmuera, que contiene una alta concentración de sales.

Cuanto mayor es la salinidad del agua de alimentación y mayor es la pureza del agua que se obtiene como producto, mayor es la energía necesaria en el proceso de desalación. La salinidad se define de acuerdo a los sólidos totales disueltos (TDS). Esto se mide en miligramos por litro (mg / l) o partes por millón (ppm). Las dos unidades son generalmente intercambiables en las soluciones diluidas, aunque ppm se usa más comúnmente en Estados Unidos de América.²

Para llevar a cabo el proceso de desalación se requiere que el agua de alimentación tenga un pre-tratamiento para eliminar impurezas, en seguida se realiza la separación en producto y salmuera, para esto se requiere suministro de energía, dependiendo el tipo de proceso que se realice, será el tipo y la cantidad de energía a utilizar. Por último al producto obtenido se le da un pos-tratamiento, el cual dependerá del uso que tenga posteriormente.

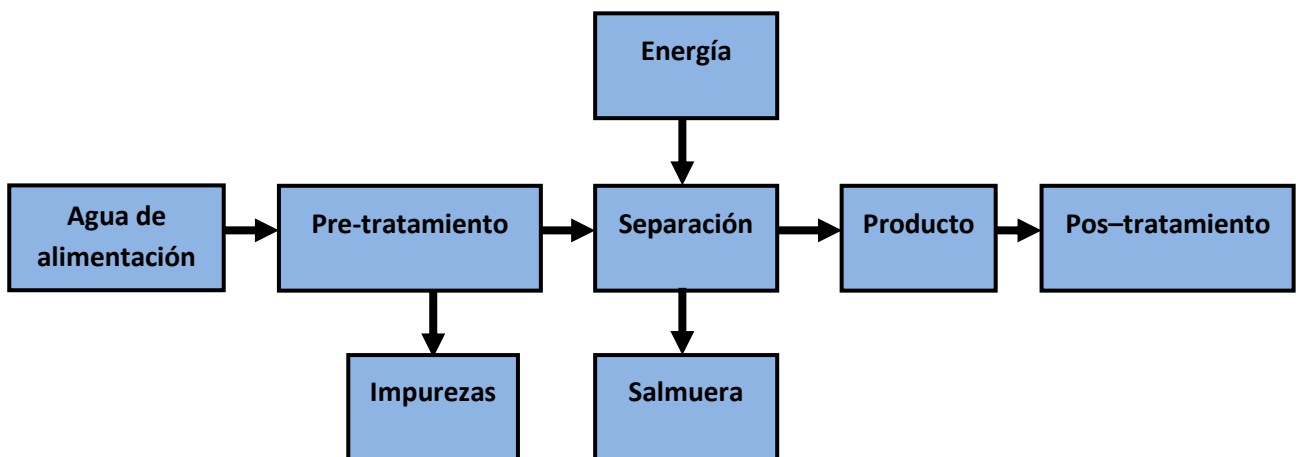


Figura 1. 2 Diagrama de una planta de desalación

1.1.2 Capacidad instalada a nivel mundial

La inminente escasez de agua ha hecho que la capacidad instalada de las plantas de desalación aumentara un 57% del 2007 al 2011. La base instalada de plantas de desalación en todo el mundo tenía una capacidad de proceso de 78.4 millones de metros cúbicos por día a mediados

² <http://desaldata.com>

del año 2012. Mientras que a finales del 2008 la capacidad global de desalación era de 47.6 millones de metros cúbicos por día.³

Lo anterior da una muestra del gran crecimiento que presenta la industria de desalación a nivel mundial. La siguiente gráfica presenta el incremento que se ha tenido desde sus inicios hasta el año 2011.

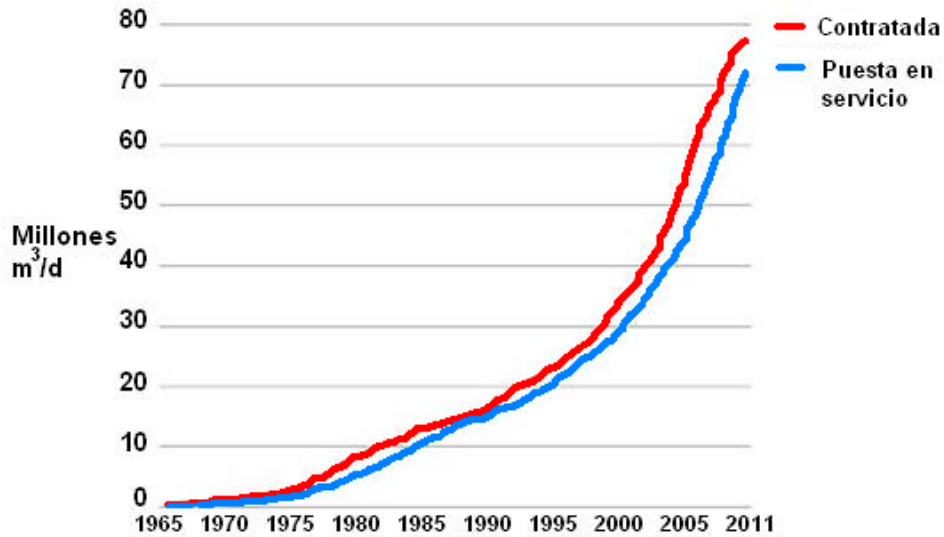


Figura 1. 3 Crecimiento de la capacidad mundial de desalación de 1965-2011 [DesalData.com]

En la primera mitad del año 2012 se aumentó la capacidad instalada solo 1.3 millones de metros cúbicos al día, en comparación con 2.1 millones de metros cúbicos al día en el mismo periodo en el 2011 y 2.6 millones de metros cúbico al día en el primer semestre del año 2010. Lo cual indica un decremento en la capacidad instalada anualmente a nivel mundial.

A continuación se presenta un gráfico que muestra el aumento anual en la capacidad instalada de desalación. Cabe mencionar que en la última barra sólo se tienen datos hasta el mes de junio del 2012.

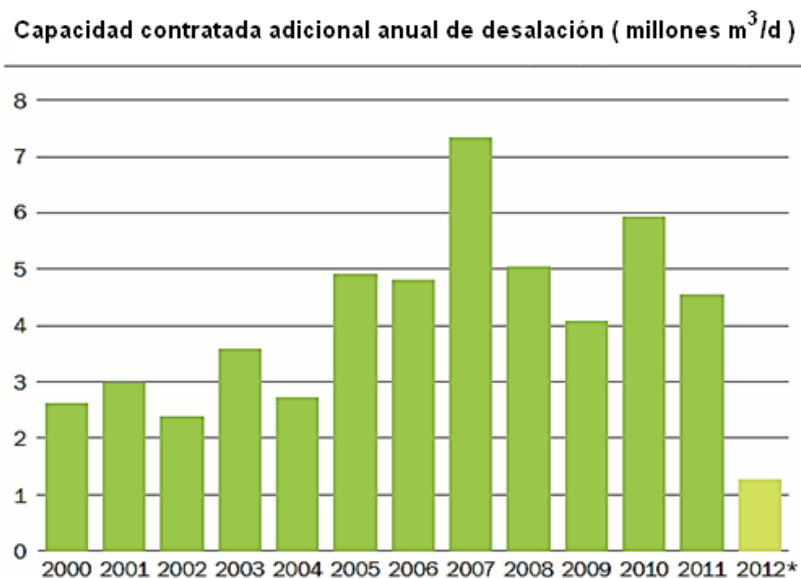


Figura 1. 4 Aumento anual en la capacidad instalada mundial de desalación [GWI DesalData]

³ <http://www.desalination.com>

Dentro de las tecnologías utilizadas a nivel mundial para la desalación se encuentran la térmica y de membrana. En el siguiente gráfico se puede observar cómo han ido evolucionando cada una a nivel mundial con respecto al tiempo.

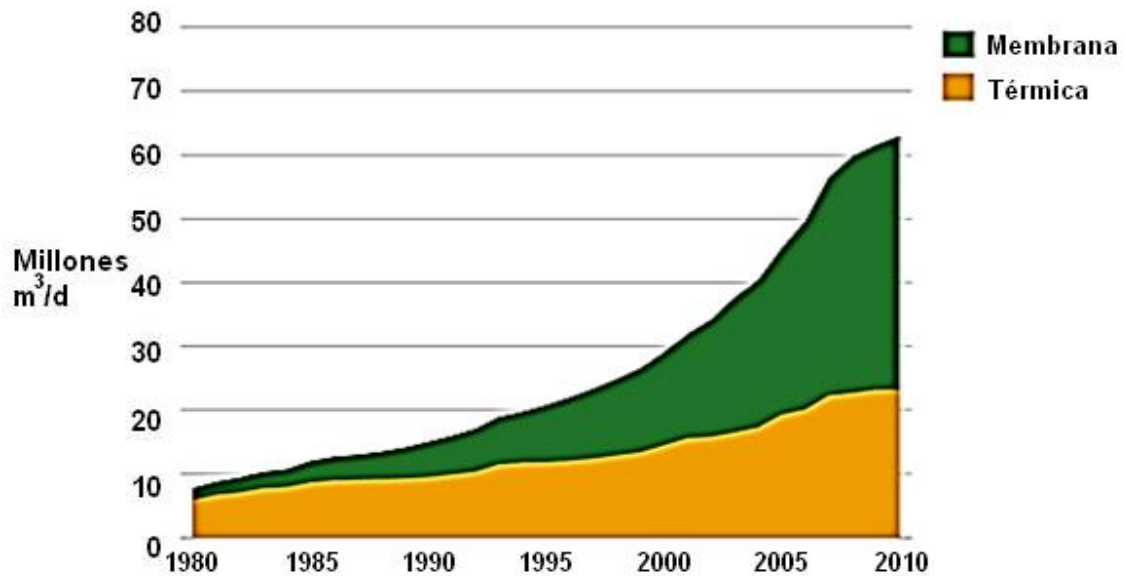


Figura 1. 5 Evolución de las tecnologías de desalación a nivel mundial con respecto al tiempo [DesalData.com]

La tecnología de membrana presenta un incremento significativo en comparación con la tecnología térmica, esto debido a diversos aspectos como el uso de energía eléctrica en vez de energía térmica, un menor costo de instalación y un bajo consumo energético.

La gráfica siguiente da la distribución de la capacidad instalada en el mundo cada año por tipo de tecnología a partir del 2006 y hasta el primer semestre del año 2012.

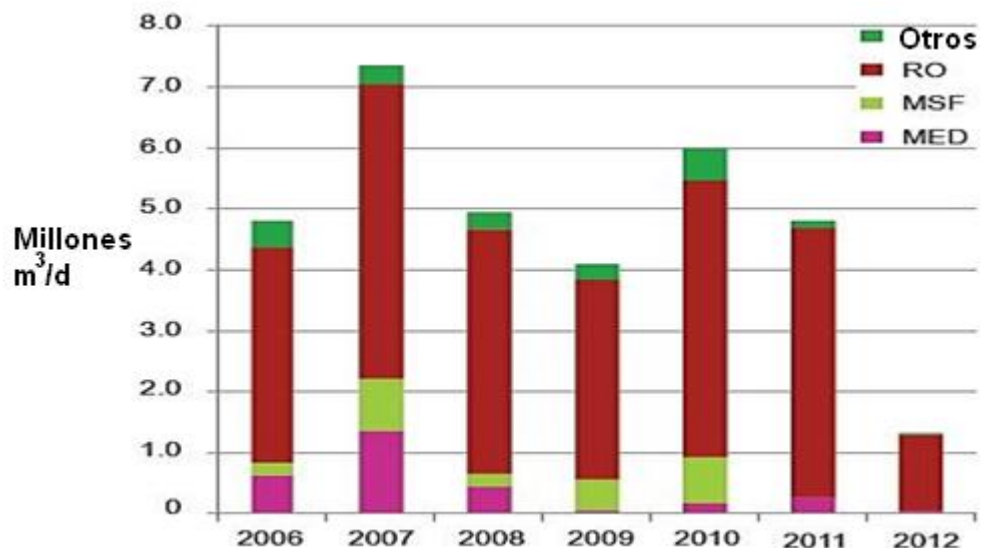


Figura 1. 6 Capacidad instalada mundial por tipo de tecnología. RO: Ósmosis inversa, MSF: Destilación instantánea de múltiple etapa, MED: Destilación de múltiple efecto [DesalData.com]

1.2 Sistemas térmicos de desalación

El principio básico de estos tipos de sistemas de desalación, es obtener agua destilada con la condensación del agua de alimentación previamente evaporada, esto debido al suministro de energía térmica que generalmente proviene de una central térmica adyacente.

Este tipo de tecnologías son muy utilizadas en el Golfo Pérsico, donde se encuentran países con problemas de escasez de agua potable y que además tienen grandes reservas de combustibles fósiles y que pueden utilizar para general la energía térmica que se requiere en la desalación.

A continuación se presentan los tres principales procesos de desalación térmica.

1.2.1 Destilación instantánea de múltiple etapa (MSF)

Se considera el proceso más antiguo en uso industrial, y aún hoy en día es muy extendido en cuanto a capacidad de producción en el mundo. El proceso se lleva a cabo con la ebullición de agua en un evaporador de numerosas cámaras que operan a temperaturas y presiones progresivamente decrecientes. Con ello se consigue evaporar agua en cada una de las etapas para formar el conjunto de la producción total.

El proceso fue desarrollado simultáneamente por Silver y Frankel en 1957 y la primera planta de evaporación súbita a escala comercial fue instalada en Kuwait en 1960. Diseñada por G&J Weir.

Es importante destacar que, si bien este proceso ha caído casi en desuso en muchos países occidentales, debido al alto consumo de energía que precisa, sigue siendo muy utilizado por diversos países del Golfo Pérsico, además de algún país europeo como Italia, ya que es el proceso con el que se puede obtener mayor volumen de agua desalada.

Este método se basa en el principio de que al reducir abruptamente la presión del agua a desalar por debajo del valor de su presión de vapor de equilibrio, ocurre una evaporación súbita. Esto se logra introduciendo el agua de mar, previamente calentada a temperatura de ebullición con vapor de una fuente externa, en una cámara a través de un orificio de forma tal de reducir así su presión. El vapor producido pasa a través de demisters donde se despoja de las gotas de salmuera que arrastra. Este vapor se condensa sobre la superficie de los tubos que alimentan el agua a desalar a la planta. El agua salada alimentada a la planta es precalentada también de esta forma con el calor cedido por el vapor durante la condensación del agua desalada que se evaporó.⁴

Una vez que el agua fue precalentada en las cámaras, es llevada a una cámara de vacío denominada “sector de calentamiento”, la temperatura alcanzada por el agua salada es normalmente de 90-110 °C. El aumento de la temperatura del agua en este sector de calentamiento está determinado por la optimización del costo de producción del agua en función del GOR y el número de etapas. El GOR es la relación entre la producción de agua y el consumo de vapor.

El agua salada calentada pasa a otra cámara denominada primera etapa. La presión en esta cámara es menor que en la anterior, siendo la correspondiente a la de saturación del agua de alimentación que inicia inmediatamente el proceso de ebullición. El condensado es colectado y enviado a la etapa siguiente donde se repite el proceso de evaporación–condensación. Este proceso se repite en varias etapas más, con menor presión entre cada una de ellas, obteniéndose el agua desalada como condensado de la última etapa.

⁴ Artículo Universidad Pontificia de Cataluña

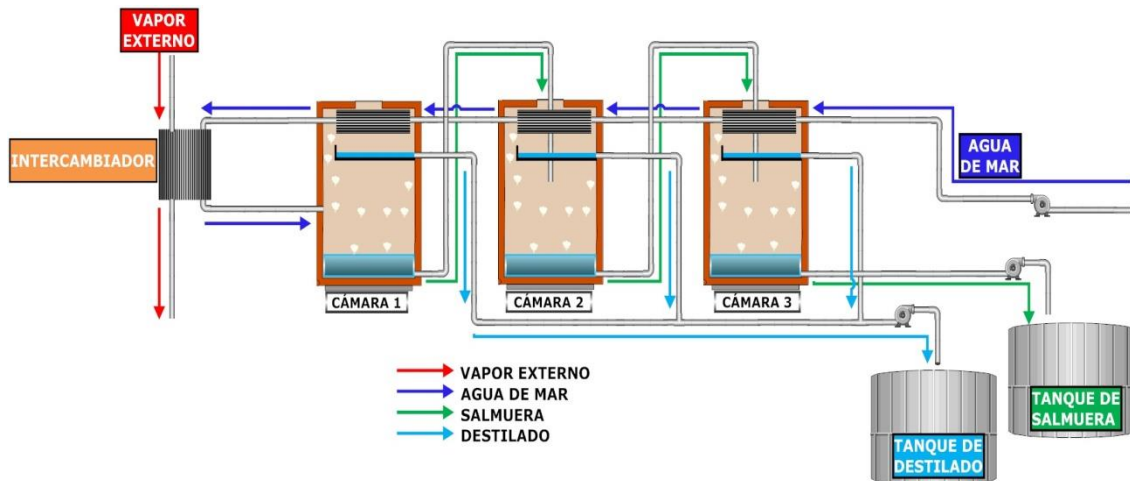


Figura 1. 7 Diagrama del proceso de destilación MSF de 3 etapas

1.2.2 Destilación de múltiple efecto (MED)

Este proceso de desalación utiliza el mismo principio que el proceso MSF, pero la diferencia radica en la forma en que se lleva a cabo la evaporación.

El agua a desalar precalentada en la etapa de condensación del vapor generado en el último efecto, ingresa al primer efecto en donde se eleva su temperatura al punto de ebullición con vapor externo. El agua salada se rocía sobre la superficie de los tubos del evaporador donde se forma inmediatamente una película delgada la cual favorece su rápida ebullición y evaporación. El vapor producido es colectado en este efecto y enviado al interior de los tubos evaporadores del efecto siguiente, el cual opera a una temperatura y presión inferior a las del anterior.

La salmuera generada en el primer efecto es también enviada al efecto siguiente donde se rocía formando una película delgada sobre la superficie de los tubos por los que circula el vapor del efecto anterior, repitiendo así el proceso de evaporación. El vapor de cada uno de los efectos se convierte así en agua desalada al ser condensado en el evaporador del efecto siguiente. El proceso se repite varias veces, dependiendo del número de efectos en el sistema.

Las plantas MED generalmente se diseñan para el funcionamiento a baja temperatura en el primer efecto, limitando de esta manera la formación de incrustaciones.

El GOR de la planta MED es aproximadamente igual al número de efectos menos uno (N-1). El menor número de efectos de las plantas MED contribuye a una importante reducción de costos en comparación con las equivalentes de MSF.

La fracción de agua desalada producida en esta planta depende de la calidad del agua de alimentación. En este proceso la recuperación máxima es aproximadamente del 30 – 40%.

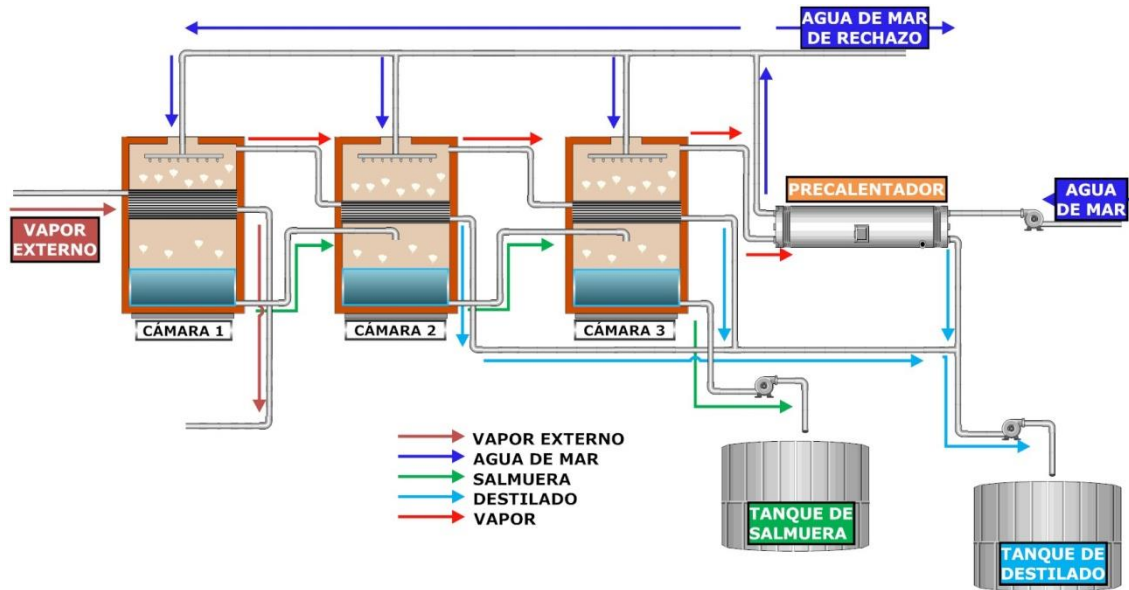


Figura 1. 8 Diagrama del proceso de destilación MED de 3 etapas

1.2.3 Destilación por compresión de vapor (VC)

En la destilación por compresión de vapor, el calor necesario para llevar el agua de mar a ebullición se obtiene directamente del vapor que es removido del evaporador y reinyectado en la primera etapa luego de ser comprimido para elevar su temperatura de saturación. La compresión de vapor puede ser efectuada por un compresor mecánico o por un termocompresor (plantas de MVC y de TVC respectivamente).

En las plantas de MVC la energía que se entrega al sistema a través del compresor, determina la magnitud del aumento de temperatura y la eficiencia de la planta. Durante la puesta en marcha de la planta se requiere energía adicional para llevar el agua de mar a la temperatura de ebullición. Esto normalmente se efectúa utilizando vapor externo de baja presión. No obstante, una vez alcanzada la temperatura de operación, el mayor ingreso de energía al sistema es a través del compresor y solamente se requiere vapor para reposición de pérdidas. El consumo de energía del compresor depende del caudal de vapor, la diferencia de temperatura en el evaporador y la temperatura de evaporación.

La capacidad de las unidades de MVC está limitada por el flujo máximo volumétrico del compresor y la presión desarrollada por el mismo, la temperatura a la que opera y la capacidad de transferencia de calor del evaporador

El proceso TVC es similar al proceso MVC. Dado que el eyector de vapor es menos eficiente que un compresor centrífugo, las plantas de TVC casi siempre se construyen con muchos efectos para lograr eficiencias globales razonables.

La fracción de agua desalada producida en las plantas de VC es dependiente de la calidad del agua de alimentación y de la temperatura. En este proceso la recuperación máxima es aproximadamente del 40-50%.

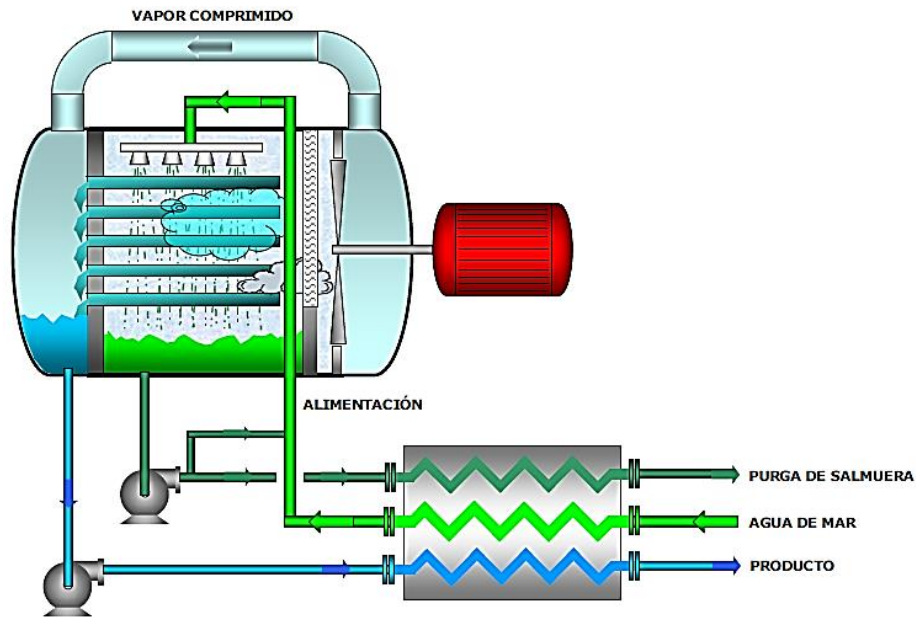


Figura 1. 9 Diagrama del proceso de destilación por compresión mecánica de vapor (MVC) [Artículo técnico 4, ecoagua.com]

1.3 Sistemas de desalación con membranas

Otra de las tecnologías utilizadas para la desalación de agua es la de membrana. A continuación se mencionan las dos más representativas, siendo la de ósmosis inversa la de mayor uso a nivel mundial.

1.3.1 Ósmosis inversa (RO)

Es un proceso para extraer sólidos disueltos del agua, tales como sales, utilizando una membrana semipermeable. Dicha membrana tiene una permeabilidad alta respecto del agua, pero su permeabilidad es muy baja para las sales. A diferencia de la destilación este proceso no involucra un cambio de fase.

La RO es un proceso donde el agua pasa a través de una membrana semipermeable impulsada por una bomba que eleva la presión hasta un vapor superior al de su presión osmótica natural. Para este propósito se utilizan típicamente una bomba de alta presión, del orden de 5.1 a 8.2 MPa.

En las plantas de desalación de agua de mar con membranas, generalmente se implementa una recuperación de energía de la corriente de salmuera que abandona la membrana a alta presión. Para ello se utilizan, entre otros, dispositivos tipo Pelton Wheel. Los citados dispositivos permiten recuperaciones de energía del orden de 28-30%.

El agua de mar, antes de ser alimentada a estas plantas, debe ser sometida a una etapa de pre-tratamiento físico-químico más complejo que la requerida por las tecnologías térmicas. Este pre-tratamiento incluye desinfección con cloro para controlar el crecimiento bacteriológico, filtración multimedia para reducir TDS, filtración con cartuchos para proteger las membranas de RO y declorinación con bisulfito de sodio. La fracción de agua desalada producida por estas plantas es aproximadamente del 30-45%.

El material de las membranas utilizadas para tratar agua de mar es generalmente poliamida; no obstante también se usan algunas membranas de acetato de celulosa. Las membranas construidas con compuestos de poliamida están caracterizadas por un flujo específico de agua

más alto y por un más bajo pasaje de sal a través de ellas respecto a los de una membrana de acetato de celulosa.

Las dos configuraciones primarias de los módulos de membranas utilizados en las aplicaciones de RO son las de fibra hueca (“hollow fiber”) y las de arrollamiento en espiral (“spiral wound”).

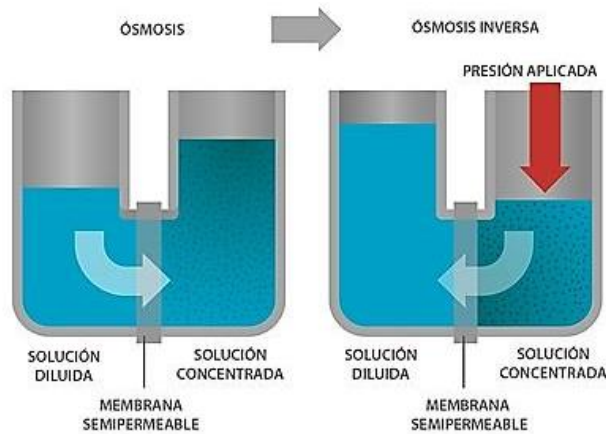


Figura 1. 10 Diagrama del proceso de desalación por ósmosis inversa [drinking-water.org]

1.3.2 Electrodiálisis (ED)

Está basada en el principio de la electrólisis, cuando se dispone de una disolución en un recipiente, y se aplica una tensión eléctrica entre dos electrodos, los iones disueltos son atraídos hacia los electrodos por efecto de las cargas eléctricas opuestas. Los cationes (iones de carga eléctrica positiva) son atraídos hacia el electrodo de polaridad negativa (denominado cátodo) mientras que los aniones lo son hacia el electrodo positivo (ánodo). La tendencia de los iones es a moverse en dirección a uno de los electrodos, dependiendo de la polaridad. En las cercanías de esos electrodos se producen determinadas reacciones químicas, llamadas reacciones de electrodo.

El conjunto del recipiente, solución y dos electrodos constituye la pila electrolítica. Naturalmente que la tensión eléctrica aplicada debe ser continua, y no alterna. En el momento en que no haya tensión entre los electrodos (circuito abierto) se interrumpe el movimiento iónico.

El flujo iónico se rige por la ley de Faraday, que establece que se requiere una determinada carga eléctrica por cada equivalente químico de compuesto que se quiera separar. Esta cantidad fija de electricidad es el número de Faraday, que tiene el valor de 96590 coulomb por cada equivalente químico de sustancia.

Si en la pila se introduce una membrana selectiva entre ambos electrodos, el efecto es distinto. La membrana selectiva en este caso está constituida químicamente de forma que permite el paso de los iones con una determinada carga, ya sea positiva o negativa, según sea la membrana. Se produce una difusión selectiva. Por tanto, se requieren dos tipos de membranas, las denominadas catiónicas o aniónicas, según el tipo de iones que son capaces de separar. Estas membranas se utilizan siempre en conjunto (aniónica y catiónica), por lo que se instalan “pares” de membranas.

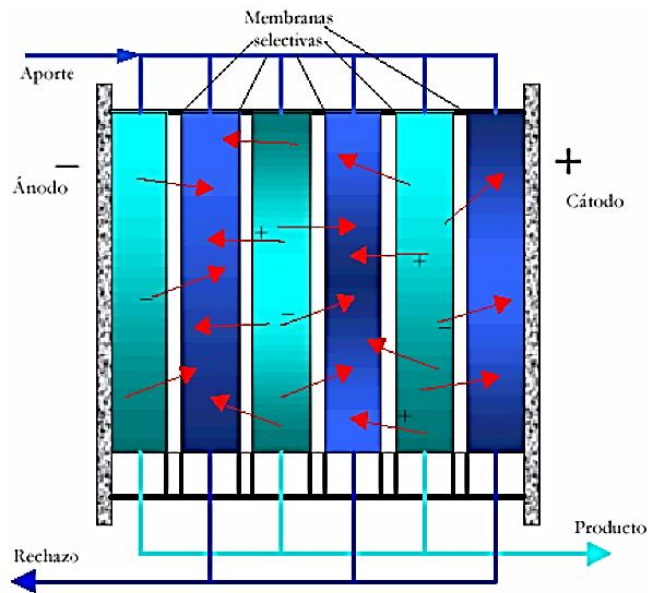


Figura 1. 11 Diagrama del proceso de desalación por electrodiálisis [Universidad Politécnica de Cataluña, upcommons.upc.edu]

1.4 Tecnologías de desalación instaladas en México

Anualmente México recibe del orden de 1,489 miles de millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 73.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.1% escurre por los ríos o arroyos, y el 4.8% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Sin embargo, a partir de la década de los setenta, ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados. En el año 1975 eran 32 acuíferos, 80 en 1985, y 100 acuíferos sobreexplotados al 31 de diciembre del 2009. De los acuíferos sobreexplotados se extrae el 53.6% del agua subterránea para todos los usos.

Es por eso, que en la desalación de agua de mar se ve una alternativa al abastecimiento de agua potable que se requiere en el país. En la tabla 1.1 se presentan datos de las plantas desaladoras que se tienen por estado, mientras que en la tabla 1.2 se muestra el tipo de proceso que se tiene en dichos estados.

Tabla 1. 1 Inventario plantas desaladoras por estado, capacidad instalada y estado de operación [Fuentes Díaz y Ramírez González, 2002]

| Estado | Plantas desaladoras | % Nacional | Opera | | Capacidad instalada m ³ /d | Capacidad que opera m ³ /d |
|-----------------------|---------------------|-------------|------------|-----------|--|--|
| | | | Si | No | | |
| Baja California | 10 | 5.8% | 7 | 3 | 9,540 | 8,040 |
| Baja California Sur | 38 | 22.2% | 32 | 6 | 8,979 | 3,346 |
| Campeche | 2 | 1.2% | 2 | 0 | 3,120 | 2,132 |
| Coahuila | 7 | 4.1% | 2 | 5 | 78 | 31 |
| Durango | 24 | 14.0% | 9 | 15 | 650 | 374 |
| Guerrero | 4 | 2.3% | 2 | 2 | 2,000 | 900 |
| Nuevo León | 2 | 1.2% | 2 | 0 | 325 | 325 |
| Oaxaca | 1 | 0.6% | 1 | 0 | 13,478 | 13,478 |
| Q. Roo | 76 | 44.4% | 57 | 19 | 27,058 | 23,266 |
| SLP | 1 | 0.6% | 1 | 0 | 60 | 5 |
| Sonora | 5 | 2.9% | 4 | 1 | 471 | 80 |
| Tamaulipas | 1 | 0.6% | 1 | 0 | 1,728 | 363 |
| Total nacional | 171 | 100% | 118 | 53 | 67,487 | 52,340 |

Tabla 1. 2 Plantas desaladoras por proceso y por estado [Fuentes Díaz y Ramírez González, 2002]

| Estado | Plantas desaladoras | Proceso | | | | SolarExperimental |
|-----------------------|---------------------|------------|----------|----------|----------|-------------------|
| | | OI | CV | MSF | Solar | |
| Baja California | 10 | 3 | 4 | 1 | 2 | 0 |
| Baja California Sur | 38 | 32 | 3 | 0 | 2 | 1 |
| Campeche | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Coahuila | 7 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Durango | 24 | 24 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Guerrero | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nuevo León | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oaxaca | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Q. Roo | 76 | 75 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| San Luis Potosí | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sonora | 5 | 4 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Tamaulipas | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total Nacional | 171 | 156 | 8 | 1 | 5 | 1 |

El IMTA en el año 2007 tenía en su inventario nacional de desaladoras un total de 320 sitios donde estaban instaladas 435 plantas de desalación. El estado con mayor número de desaladoras era Quintana Roo, con 124 unidades, le seguía Baja California Sur, con 71.

Se estima que en México existen cerca de 500 plantas desaladoras, con una capacidad instalada de aproximadamente 200,000 m³/día. En los últimos cinco años se han puesto en operación dos de las más grandes plantas en el país. La planta de Cabo San Lucas en Baja California Sur es la más grande con una capacidad de 200 l/s de agua desalada, ésta inicio operación en 2007. En 2010, la planta de Litibú fue puesta en marcha en el estado de Nayarit con una capacidad de 120 l/s. Existe otra planta en construcción en Ensenada, Baja California con una capacidad de 250 l/s; la cual entró en función en el año 2013.

Conclusiones del capítulo 1

La desalación es un proceso que se realiza en el mundo desde hace varias décadas, esto con la finalidad de obtener agua baja en sales y que se pueda utilizar en las actividades del ser humano, ya que el gran aumento de la población y el poco cuidado que se tiene del agua potable, han hecho que se cada vez sea más escasa.

Los procesos que se emplean en la desalación se pueden dividir en dos grupos, los térmicos y los de membrana. El uso de alguno de ellos dependerá del tipo de energía que se tenga, así como de la cantidad de agua que se desea desalar.

México tiene vastas extensiones costeras, lo cual puede favorecer en el uso de tecnologías de desalación para obtener agua que puede ser usada en diversas actividades humanas. Existen en nuestro país zonas con graves problemas de escases de agua y que a la vez se encuentran cerca del mar, lo cual puede aprovecharse para solucionar dichos problemas.

CAPÍTULO 2. LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

En este capítulo se presenta los aspectos más relevantes de la energía geotérmica, desde su definición hasta las aplicaciones que tiene actualmente. Primero se describen las causas que originan las manifestaciones geotérmicas, asimismo, se da una breve reseña histórica de las aplicaciones que ha tenido en el mundo, en seguida se menciona los diferentes sistemas geotérmicos que existen.

Una parte fundamental que se tratará en este capítulo es la clasificación que se le ha dado a los recursos geotérmicos con base en las temperaturas que presentan, ya que de éstas dependen las aplicaciones que tendrán.

Por último se dará a conocer la situación de la geotermia en México, mencionando el inicio en nuestro país de la generación de energía eléctrica, las plantas geotermoelectricas con que se cuenta actualmente y los usos directos que se tienen.

2.1 Antecedentes

La palabra *geotermia* es de origen griego y deriva de “geos” que significa *tierra*, y de “*thermos*” que quiere decir *calor*: el calor de la tierra. La gran mayoría de este calor es generado por el material fundido denominado magma. El cual pocas veces llega a la superficie y se acumula a profundidades entre 5 y 10 km, en donde suele calentar grandes regiones de roca o reservorios de fluidos confinados, los cuales dan origen a la formación de los sistemas geotérmicos.

Se denomina energía geotérmica o simplemente geotermia al estudio y utilización de la energía térmica que, transportada a través de la roca y/o de fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma. Se presentan diversas manifestaciones de esta energía como fumarolas, manantiales termales, géiseres y volcanes.

Desde el centro hasta la superficie, el planeta está constituido por tres capas sucesivas de temperatura decreciente:

El núcleo: Sólido en su parte interna y líquido en su parte exterior. Su temperatura puede alcanzar los 4200 °C.

El manto: es la capa que envuelve al núcleo, con temperaturas que van desde los 3.000 °C a 1.000 °C. Se vuelve sólido hacia la superficie.

La corteza: Que corresponde a la envoltura superficial. Su temperatura varía desde los 1.000 °C en su contacto con el manto, hasta los 15-20 °C de la superficie terrestre. Su espesor varía desde 5 a 20 km en las profundidades oceánicas, y desde 30 a 70 km bajo los continentes.

El resultado de esta estructura interna es que el 99% de la masa de la Tierra está sometida a una temperatura superior a los 1.000 °C, y únicamente un 0,1% de la misma soporta temperaturas inferiores a los 100 °C.

En ciertos lugares geotérmicos, el gradiente geotérmico suele llegar a ser varias veces mayor que el gradiente normal (cuyo promedio es de 30 °C/km). Es por ello, que en estas zonas es posible encontrar fluidos con temperaturas entre 200 °C y 350 °C, a profundidades promedio de 3 km.⁵

⁵ Llopis G., Rodrigo V. Guía de la Energía Geotérmica, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. España

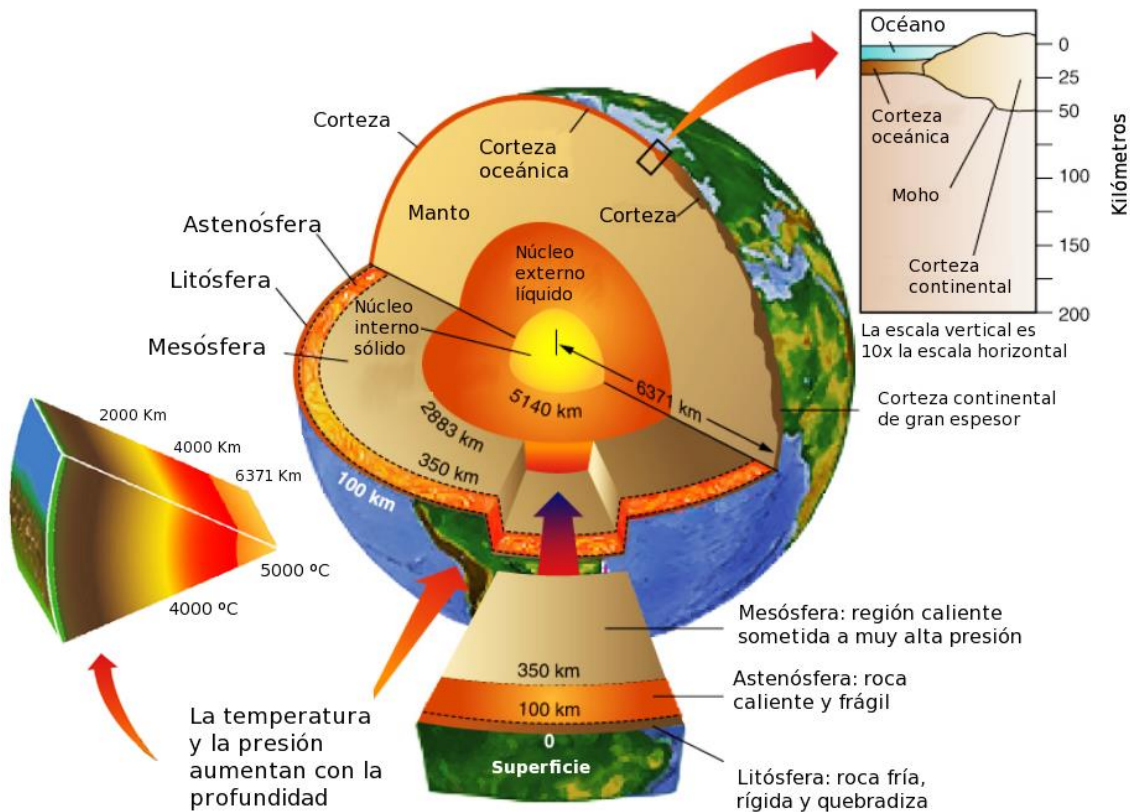


Figura 2. 1 Capas que conforman la estructura de la Tierra. [Revista Digital Universitaria. Volumen 11. Número 10]

Las corrientes convectivas del Manto hacen que la Litósfera situada sobre él sea arrastrada en diversas direcciones. Esto origina la división de la Litósfera en placas con diferentes movimientos.

A las zonas de separación de las placas litosféricas se les denomina límites de placa. Debido a los posibles movimientos relativos de dos placas, estos límites se clasifican en:

Límites divergentes: Cuando el movimiento de las placas es de separación, deja un "hueco" aprovechado por rocas magmáticas para generar nueva corteza oceánica. También se les llama Zonas de Dorsal o límites constructivos.

Límites convergentes: Cuando el movimiento que realizan las placas es de aproximación, obliga a una de las placas (la más densa) a introducirse bajo la otra en un proceso que se denomina subducción. A estas zonas también se les denomina zonas de subducción o límites destructivos.

Límites transcurrentes. Existen zonas donde el movimiento de las placas es paralelo y de sentido contrario, conocidas también por zonas de falla transformante.

Así, estos límites dividirían en placas a la litósfera en continuo movimiento, con unas placas creciendo a partir de su límite de dorsal y otras menguando a partir de su zona de subducción.



Figura 2. 2 Placas litosféricas, dorsales oceánicas, fosas oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos. Las flechas muestran la dirección del movimiento de las placas hacia las zonas de subducción. 1) Campos geotérmicos que producen electricidad; 2) Dorsales meso-oceánicas cruzadas por fallas transcurrentes (largas fracturas transversales); 3) Zona de subducción, donde la placa subducida se inclina hacia abajo y se funde en la astenosfera. [Dickson & Fanelli, 2004]

2.2 Clasificación de los sistemas geotérmicos⁶

La acumulación del calor que se obtiene del interior de la tierra se da en zonas llamadas sistemas geotérmicos, los cuales se pueden clasificar de la siguiente manera:

a) Sistemas convectivos hidrotermales

Se constituyen por presentar una fuente de calor, fluido (líquido y/o vapor) y roca, en donde se almacena el fluido geotérmico (yacimiento o reservorio). El fluido que se encuentra en estos sistemas se obtiene por agua meteórica (agua de lluvia, hielo o de nieve). Esta agua se infiltra lentamente en la corteza terrestre, a través de poros y fracturas, penetrando varios kilómetros de profundidad en donde es acumulada y calentada por la roca, interacción que puede alcanzar en ocasiones temperaturas de hasta 500 °C.

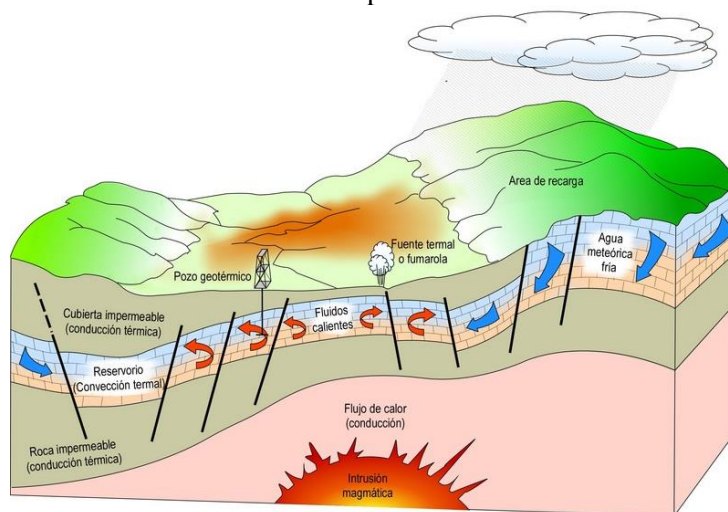


Figura 2. 3 Modelo esquemático de un sistema geotérmico hidrotermal. [Dickson & Fanelli, 2004]

⁶ Santoyo E., Torres I. S. Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable. CIE, UNAM. Revista Digital Universitaria, volumen 11, número 10. 1 octubre 2010

Estos sistemas pueden a su vez clasificarse en: yacimientos de vapor dominante, líquido dominante de alta entalpía y líquido dominante de baja entalpía. Estos yacimientos pueden estar asociados con sistemas volcánicos o no-volcánicos dependiendo de la temperatura de sus recursos. Cuando las temperaturas son superiores a 200 °C, los yacimientos tienen correlación con sistemas volcánicos y la tectónica de placas, mientras que a temperaturas menores se relacionan generalmente con sistemas no-volcánicos, siendo estos últimos los más comunes. En la actualidad, los sistemas convectivos hidrotermales son los sistemas geotérmicos más convencionales y los que se explotan comercialmente, tanto para la generación de electricidad, como en usos directos.

b) Sistemas geotérmicos mejorados o de roca seca caliente.

Los sistemas geotérmicos mejorados, también conocidos como sistemas de roca seca caliente, son concebidos actualmente como una nueva generación de sistemas con un alto potencial térmico. Se caracterizan principalmente por la disponibilidad de una fuente de calor (roca caliente) y la ausencia de fluidos debido a las características geológicas propias de estos sistemas, generalmente rocas cristalinas y no permeables. La explotación de un sistema geotérmico mejorado implica la creación artificial de un yacimiento fracturado mediante técnicas de fracturamiento hidráulico y acompañado por la inyección de agua a temperatura ambiente a través de un pozo inyector perforado para estos fines. Esta agua es calentada por conducción al entrar en contacto con la roca seca caliente y después de adquirir condiciones adecuadas de presión y temperatura, es extraída mediante un segundo pozo productor para su aprovechamiento en la superficie.

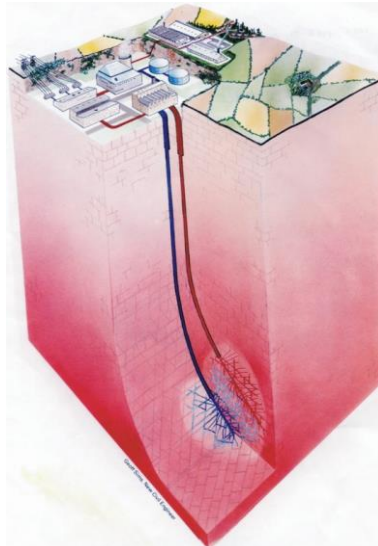


Figura 2. 4 Modelo esquemático de un sistema geotérmico mejorado. [Dickson & Fanelli, 2004]

Este recurso se encuentra disponible en el subsuelo a 2-4 km de profundidad en todo el planeta, con temperaturas atractivas para la generación de electricidad (en el intervalo 90-350 °C), por lo que se consideran sistemas más abundantes y prácticamente inagotables. No obstante que el proceso de explotación de los sistemas geotérmicos mejorados parece ser muy simple, tecnológicamente todavía presenta algunas barreras y retos por resolver para su explotación comercial, entre las cuales destacan: (a) la creación de un volumen apropiado de roca fracturada; (b) la disposición segura de un sistema tecnológico comercialmente atractivo; (c) la minimización del enfriamiento en el agua geotérmica producida; (d) la minimización de pérdidas de agua inyectada hacia la formación fracturada; y (e) la minimización de problemas de microsismicidad inducida por estos proyectos.

c) Sistemas geotérmicos geopresurizados

Contienen agua y metano disuelto a alta presión (~700 bar) y mediana temperatura (entre 90 y 200 °C) y están generalmente confinados en yacimientos de roca sedimentaria. Este tipo de recursos de alta presión

pueden ofrecer energías: térmica (agua caliente), química (metano) y mecánica (energía cinética debido a los fluidos con alta presión). Actualmente no se explotan comercialmente, aunque existen detectados algunos sistemas en Texas y Louisiana (E.U.). Se ha estimado el potencial energético solamente en las costas de Texas en unos 40,000 MWt. Se desconoce el potencial de este recurso en México.

d) Sistemas geotérmicos asociados con cuencas sedimentarias

Estos sistemas pueden producir recursos de baja y mediana temperatura (20 a 150 °C) debido a su flujo de calor y a la baja conductividad térmica de las rocas con gradientes geotérmicos superiores a los normales >30 °C/km. Algunos intentos están siendo evaluados para desarrollar proyectos geotérmicos en cuencas sedimentarias con flujos de calor atractivos. Estos sistemas se han detectado en regiones típicas de la formación Madison en el Norte y Sur de Dakota, Montana and Wyoming en los E.U., así como en la cuenca Pannonian de Europa central (Hungría, en donde se usan como recursos de baja entalpía).

e) Sistemas geotérmicos radiogénicos

Sistemas asociados a intrusiones graníticas que con el calor generado por el decaimiento radioactivo de los isótopos de torio, potasio y uranio calientan el agua subterránea local. Este calentamiento incrementa los gradientes geotérmicos arriba del promedio global y provee un fluido factible de aprovecharse con la perforación de pozos profundos. Este tipo de recursos geotérmicos se tienen disponibles en el Este de los E.U., aunque no han sido todavía explotados comercialmente.

f) Sistemas geotérmicos marinos

Recursos geotérmicos de alta entalpía existentes en el fondo del mar y manifestados como descargas hidrotermales, chimeneas o fumarolas. Los sistemas marinos han sido poco estudiados hasta ahora, aunque se han detectados ya algunos en México en el Golfo de California con temperaturas hasta de 350 °C y flujos de calor de hasta 0.34 W/m².

g) Sistemas geotérmicos magmáticos

Sistemas de roca fundida asociados con aparatos volcánicos activos o detectados a gran profundidad en zonas de debilidad cortical. Existen algunos proyectos piloto desarrollados en Hawaii (Volcán Mauna) y Heimaey en Islandia (una de las islas Westmann) para tratar de extraer la energía térmica de los procesos de fusión de roca. El atractivo más importante de este tipo de recursos son las altas temperaturas disponibles >800 °C. No se explotan comercialmente en la actualidad por falta de tecnología apropiada. A largo plazo, cuando se disponga la tecnología y los materiales adecuados para resistir la corrosión y las altas temperaturas, se podría explotar la enorme cantidad de energía almacenada en las cámaras magmáticas de los volcanes activos.

h) Sistemas geotérmicos de agua caliente asociados con yacimientos de petróleo y gas

Existen hoy en día, otro tipo de recursos geotérmicos disponibles para su posible explotación a partir del calor contenido en el agua producida en pozos profundos de petróleo o gas. Esta agua caliente puede ser co-producida ya sea con petróleo o extraída a partir de los pozos petroleros que han sido abandonados por no tener una producción rentable, o simplemente por agotamiento del yacimiento. Su explotación no se ha

hecho aún atractiva debido a que no se tiene evaluado completamente el recurso térmico disponible, en términos de las temperaturas y la producción de agua en estos sistemas.

i) Sistemas geotérmicos supercríticos

Son sistemas muy profundos caracterizados por disponer fluidos geotérmicos en estado supercrítico y con temperaturas de hasta 600 °C. Hoy en día se han detectado en Islandia, en donde se lleva a cabo un proyecto de perforaciones profundas conocido por su acrónimo IDDP (“Iceland Deep Drilling Project”). El fluido supercrítico puede proveer hasta 10 veces más energía que la de un fluido almacenado en un sistema geotérmico convencional

2.3 Historia de las aplicaciones de la geotermia

Los recursos geotérmicos se han utilizado desde hace miles de años, un claro ejemplo de esto es que desde hace 3500 años antes de Cristo, las primeras civilizaciones tomaban baños termales y utilizaban los barros termominerales, sin embargo fueron los griegos y en seguida los romanos los que utilizaron la energía geotérmica en diversas aplicaciones como la calefacción urbana, las tradicionales termas y los baños públicos.

Para el año 1330 en algunos hogares en Chaudes-Aigues, Francia se contaba con una red de distribución de agua caliente. Mientras que en la región de Volterra, en Toscana, Italia se extraía ácido sulfúrico concentrado y alumbre de pequeñas lagunas con agua caliente salobre de las que se escapaba vapor a más de 100 °C.

Tiempo después, en el año de 1818 se marca el inicio de la utilización industrial de los recursos geotérmicos con el descubrimiento de sales de boro en Larderello, Italia. Mientras tanto, en 1827 el francés Francois Larderel, desarrolló un sistema para utilizar el calor de los fluidos en el proceso de evaporación, en lugar de quemar madera de los bosques cercanos, que se encontraban en rápida deforestación.

Años más tarde, en 1892 en el continente americano entró en funcionamiento la primera red local de calefacción urbana en Boise, Idaho, Estados Unidos.

Ya en siglo XX, en el año de 1904 la industria del ácido bórico en Larderello dio paso a la generación de electricidad a partir de vapor geotérmico y en 1913, se puso en función una central de 250 kW.

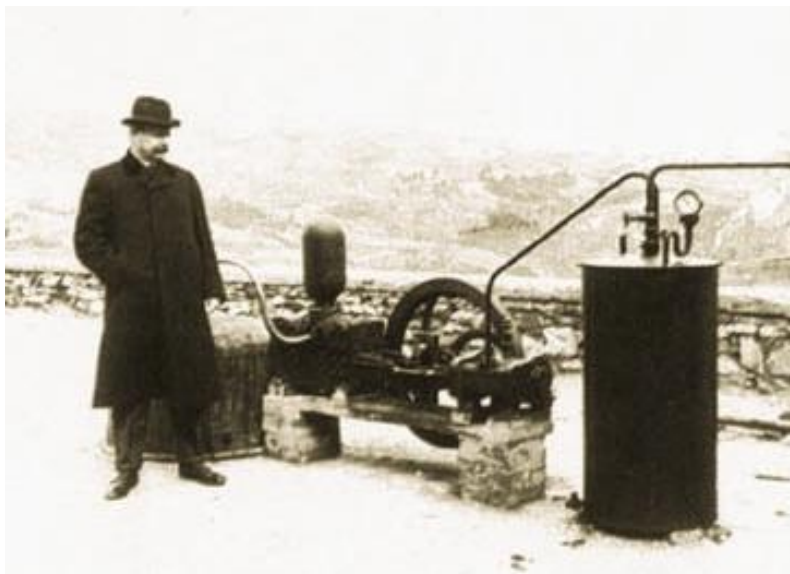


Figura 2. 5 Máquina de generación de energía eléctrica mediante vapor geotérmico usada en Larderello en 1904, con su inventor, el Príncipe Piero Ginori Conti. [Dickson & Fanelli, 2004]

En 1930 se instaló en Reikjavik, Islandia, la primera red moderna de calefacción urbana alimentada por energía geotérmica. Desde entonces, la energía geotérmica se utiliza en redes de calefacción en varios países como Francia, Hungría, Italia, Turquía, Estados Unidos, China, Rusia, Rumania y la propia Islandia.

Con respecto a las bombas de calor, la primera que se instaló en una vivienda fue en 1945 en Indianápolis, Estados Unidos. Le siguió otra que entró en funcionamiento en la Universidad del Estado de Ohio en 1948 y una más en una casa experimental en la Universidad de Toronto, Canadá en 1949.

Como consecuencia del aumento en el precio del crudo a partir de la década de los setenta y de la presión de las exigencias ambientales en la década de los noventa, cuando el uso de las bombas de calor geotérmicas tiene un mayor desarrollo a nivel internacional.⁷

2.4 Recursos geotérmicos y sus aplicaciones⁸

El concepto de recurso geotérmico es tan amplio que engloba desde el calor que se puede encontrar en las partes más superficiales del suelo, hasta el calor almacenado en rocas situadas a las profundidades que se podrían alcanzar con técnica de perforación de pozos petrolíferos.

Por tal motivo, distintos investigadores han dado una definición y clasificación de los recursos geotérmicos. Para Muffler y Cataldi (1978), cuando hablamos de recursos geotérmicos nos referimos usualmente a lo que en forma más precisa se denomina recurso accesible base; esto es, toda la energía térmica almacenada hasta una determinada profundidad en la corteza, en una determinada área y calculada a partir de la temperatura media anual de la localidad. El recurso accesible base incluye el recurso accesible base utilizable (= Recurso) – que corresponde al recurso que puede ser económica y legalmente extraído en un determinado tiempo futuro (menos de 100 años). Esta categoría incluye el recurso económico identificado (= Reserva) – aquella parte de los recursos de un área determinada que pueden ser legalmente extraídos, a un costo competitivo con respecto a otras fuentes comerciales de energía y que son conocidos y caracterizados mediante sondajes o por evidencias geológicas, geoquímicas y geofísicas. La figura muestra gráficamente lo dicho anteriormente y otros términos que pueden ser utilizados por especialistas geotérmicos.

⁷ Llopis G., Rodrigo V. Guía de la Energía Geotérmica, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. España.

⁸ Asociación Geotérmica Internacional (IGA): <http://www.geothermal-energy.org>

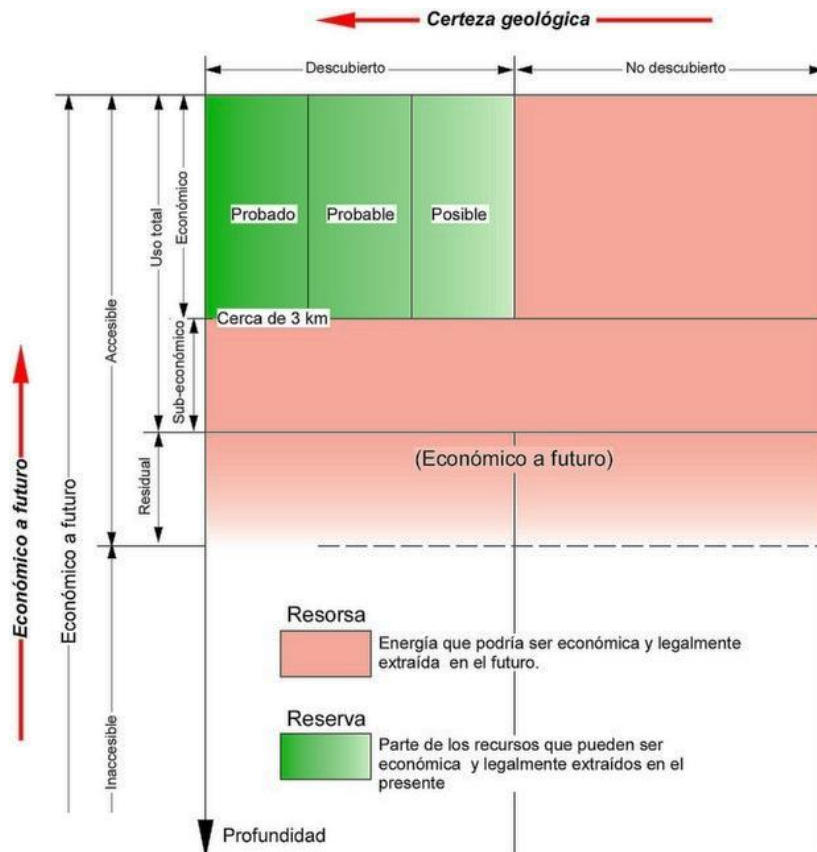


Figura 2. 6 Diagrama de las diferentes categorías de recursos geotérmicos (Muffler y Cataldi 1978). El eje vertical es el grado de factibilidad económica; el eje horizontal es el grado de certeza geológica. [Dickson & Fanelli, 2004]

Para fines prácticos, es más común clasificar a los recursos geotérmicos basándonos en la entalpía de los fluidos geotermales que actúan como medio de transporte desde las rocas calientes en profundidad hasta la superficie. La entalpía, puede considerarse más o menos proporcional a la temperatura, este término se utiliza para expresar el contenido de energía térmica de los fluidos y da una idea de su “valor”.

Los recursos geotérmicos se dividen en baja, media y alta entalpía, de acuerdo con criterios basados generalmente en la energía contenida en los fluidos y en sus posibles formas de utilización.

Tabla 2. 1 Clasificación de los recursos geotérmicos [Dickson & Fanelli, 2004]

| RECURSOS GEOTÉRMICOS | Muffler y Cataldi (1978) | Hochstein (1990) | Benderitter y Cormy (1990) | Nicholson (1993) | Axelsson y Gunnlaugsson (2000) |
|----------------------|--------------------------|------------------|----------------------------|------------------|--------------------------------|
| BAJA ENTALPIA [°C] | <90 | <125 | <100 | ≤150 | ≤190 |
| MEDIA ENTALPIA [°C] | 90-150 | 125-225 | 100-200 | - | - |
| ALTA ENTALPIA [°C] | >150 | >225 | >200 | >150 | >190 |

2.4.1 Recursos geotérmicos de alta entalpía y aplicaciones

Se consideran de alta entalpía cuando presentan una temperatura mayor a 200 °C. Se encuentran en zonas geográficas con gradiente geotérmico extraordinariamente elevado, hasta 30 °C cada 100 m. Esas zonas suelen coincidir con la existencia de fenómenos geológicos notables, como actividad sísmica elevada, formación de cordilleras en épocas geológicas recientes, actividad volcánica muy reciente y, principalmente,

regiones volcánicas situadas en los bordes de las placas litosféricas. Se suelen explotar a profundidades comprendidas entre 1500 y 3000 m.

La generación de electricidad es la forma de utilización más importante de los recursos geotérmicos de alta entalpía. Dependiendo de sus características, la generación de electricidad se realiza principalmente mediante turbinas de vapor convencionales, las cuales requieren fluidos a temperaturas de por lo menos 150 °C y están disponibles con descarga atmosférica o bien con descarga de condensación. Las turbinas con escape atmosférico son más simples y de menor costo. El vapor, directamente de pozos de vapor seco o, después de la separación, desde pozos de vapor húmedo, es pasado a través de la turbina y descargado a la atmósfera.

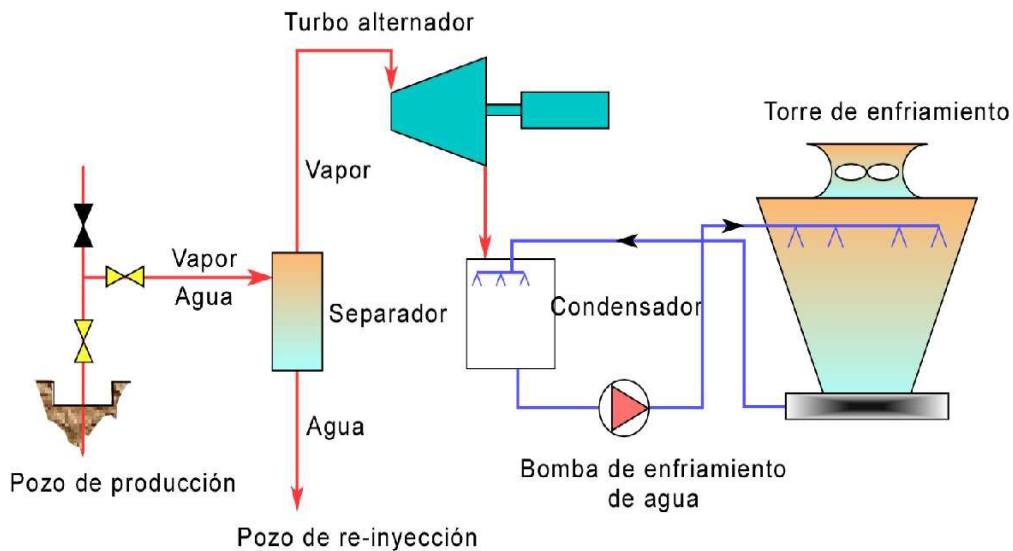


Figura 2. 7 Esquema de una planta geotermoelectrica de condensación. [Dickson & Fanelli, 2004]

2.4.2 Recursos geotérmicos de media entalpía y aplicaciones

Su rango de temperatura está entre 150-200 °C. Se encuentran en numerosos lugares del planeta: en cuencas sedimentarias, como los de baja entalpía, pero a profundidades comprendidas entre 2000 y 4000 m; en zonas de adelgazamiento litosférico; en zonas con elevada concentración de isótopos radiactivos; o en los mismos ámbitos geológicos que los yacimientos de alta entalpía, pero a menor profundidad, menos de 1000 m.

Yacimientos de este tipo se encuentran en un gran número de zonas muy localizadas donde, debido a discontinuidades y fallas, el agua puede remontar fácilmente hasta la superficie, señalando su presencia mediante aguas termales.

La generación de electricidad a partir de fluidos de temperatura baja a media, o bien, a partir de aguas calientes provenientes de los separadores en campos geotérmicos de tipo agua dominante, ha tenido significativos progresos debido al mejoramiento logrado en la tecnología de fluidos binarios, como son el Ciclo Rankine Orgánico (ORC) que recurre a fluidos orgánicos (hidrocarburos naturales o halogenados) caracterizados por tener una baja entalpía de vaporización y el Ciclo Kalina, propuesto en la última década del siglo pasado, siendo similar al ciclo Rankine pero usando como fluido de trabajo una mezcla de amoníaco y agua, de modo que a presión constante la temperatura de evaporación crece conforme se va absorbiendo calor. El fluido geotermal entrega calor al fluido secundario a través de intercambiadores de calor, en los cuales este fluido es calentado y vaporizado; el vapor producido acciona una turbina normal de flujo axial, posteriormente es enfriado y condensado, y el ciclo comienza nuevamente.

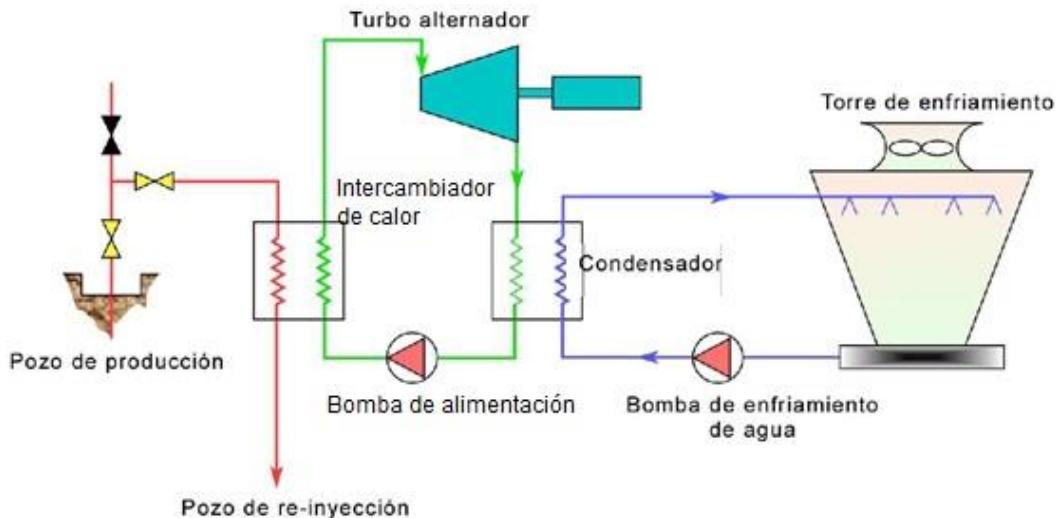


Figura 2. 8 Esquema de una planta geotermal binaria. El flujo del fluido geotermal está en rojo, el fluido secundario en verde. [Dickson & Fanelli, 2004]

2.4.3 Recursos geotérmicos de baja entalpia y aplicaciones

La geotermia de baja entalpia se caracteriza por tener temperaturas menores a los 100 °C, es la más fácil de ubicar, en comparación con la de media y la de alta, ya que sus manifestaciones son más visibles en la superficie terrestre y en determinados lugares, es posible encontrarla a pocos metros de profundidad. Un lugar que presenta esta ventaja es la Península de Baja California, donde un grupo de trabajo del Instituto de Ingeniería de la UNAM se dio a la tarea de buscar lugares que tuvieran geotermia de baja entalpia, consiguiendo ubicar fuentes de agua caliente que pueden alcanzar más de 90 °C.

Los usos que se le pueden dar a este tipo de recurso pueden ser muy diversos, actualmente en el mundo se ha optado por utilizarlo en mayor medida en bombas de calor, sin embargo, con un adecuado estudio, se podría ocupar en otros procesos que requieran energía térmica de baja temperatura, por ejemplo en los sistemas térmicos de desalación que se mencionaron en el primer capítulo.

Algunas de las aplicaciones más usuales son las siguientes:

La calefacción ambiental y distrital ha tenido un gran desarrollo como es el caso de Islandia. Esta forma de calefacción está también ampliamente distribuida en los países de Europa Oriental, como Estados Unidos, China, Japón, Francia, etc. Los sistemas geotermiales de calefacción distrital requieren grandes inversiones de capital. Los mayores costos corresponden a la inversión inicial, en pozos de producción y de reinyección, en bombas dentro de pozos, tuberías y redes de distribución, en equipos de monitoreo y control y estanques de almacenamiento.

La refrigeración es una opción factible de utilizar geotermia mediante la adaptación de equipos de absorción. La tecnología de estos equipos es bien conocida y se encuentra a disposición en el mercado. El ciclo de absorción es un proceso que utiliza calor como fuente de energía en vez de electricidad. El efecto de refrigeración se logra mediante la utilización de 2 fluidos: un refrigerante, que circula, se evapora y condensa, y un segundo fluido o absorbente. Para aplicaciones sobre 0 °C (principalmente en refrigeración y procesos de aire acondicionado), el ciclo utiliza bromuro de litio como absorbente y agua como refrigerante. Para aplicaciones bajo 0 °C se emplea un ciclo de amoníaco/agua, con amoníaco como refrigerante y agua como absorbente, los fluidos geotermiales proporcionan la energía geotérmica que alimenta estos equipos, a pesar que su eficiencia disminuye con temperaturas menores que 105 °C.

El aire acondicionado geotermal (calefacción y enfriamiento) ha tenido una considerable expansión desde los años 1980, conjuntamente con la introducción y generalización del uso de bombas de calor. Los diferentes

sistemas de bombas de calor disponibles permiten extraer y utilizar económicamente el calor contenido en cuerpos de baja temperatura, tales como suelos, acuíferos someros, lagunas, etc.

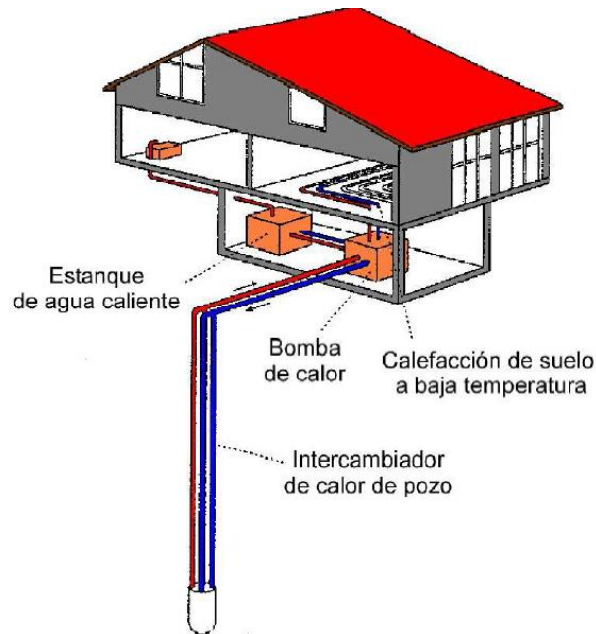


Figura 2. 9 Aplicación típica de sistema de bomba de calor [Dickson & Fanelli, 2004]

Las aplicaciones agrícolas de los fluidos geotermiales consisten en calefacción a campo abierto e invernaderos. El agua termal puede ser utilizada en agricultura a campo abierto para regar y/o calentar el suelo. La mayor desventaja en el riego con agua tibia es que para conseguir alguna significativa variación en la temperatura del suelo, se requieren grandes cantidades de agua a temperaturas suficientemente bajas como para no dañar las plantas del campo que se debe regar.

Acuicultura, es la crianza controlada de organismos acuáticos, actividades que actualmente está adquiriendo importancia a nivel mundial, debido al aumento de la demanda. El control de las temperaturas de cultivo de especies acuáticas es de mucho mayor importancia que respecto de las especies terrestres. Manteniendo artificialmente una temperatura óptima es posible cultivar más especies exóticas, mejorar la producción e incluso, en algunos casos, duplicar el ciclo reproductivo. Las especies que habitualmente son cultivadas incluyen: carpas, barbos, róbalo, salmonetes, angulas, salmones, esturiones, camarones, langostas, cangrejos de río, cangrejos, ostras, almejas, ostiones, mejillones y abalones.

A continuación se presenta un esquema que muestra las temperaturas comunes para cada tipo de aplicación de los recursos geotérmicos.

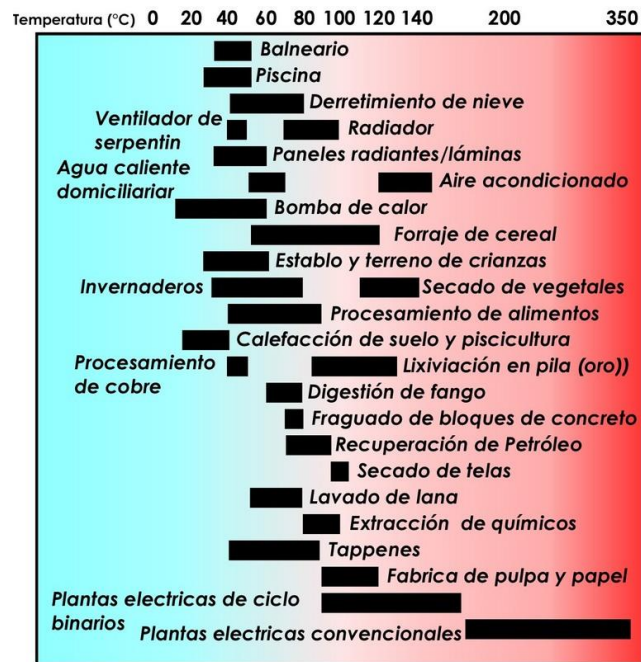


Figura 2. 10 Aplicaciones de los recursos geotérmicos con base en su temperatura [Dickson & Fanelli, 2004]

2.5 La geotermia en México

México es un país que cuenta con un gran potencial geotérmico, debido a su ubicación geográfica. Tiene dentro de su territorio nacional relieves formados por movimientos tectónicos, así como volcanes activos.

2.5.1 Historia de la generación geotermoeléctrica en México

A finales de la década de los cuarenta el ingeniero Luis de Anda, de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se enteró de los logros obtenidos en el campo geotérmico de Larderello (Italia). Esto lo motivó para efectuar estudios en ese lugar, en donde se familiarizó con las técnicas de exploración y explotación que allí se utilizaban. En el mes de mayo de 1955 se formó la Comisión de Energía Geotérmica, cuyo director fue el mismo ingeniero De Anda.

La explotación de la energía geotérmica en México se inició en Pathé, una localidad del estado de Hidalgo, la cual se encuentra aproximadamente a 130 kilómetros de la Ciudad de México. Debido al éxito de las primeras perforaciones, se decidió instalar una planta piloto de 3.5 MWe. Esta unidad inició su operación en el mes de noviembre de 1959. Se perforaron 17 pozos, sin embargo, nunca fue posible obtener suficiente vapor para generar más de 600 kW. La planta se mantuvo generando hasta 1973.

2.5.2 Usos directos de la Geotermia

Los usos directos de la energía geotérmica en México se han limitado en aplicaciones de recreación (balneología) y tratamientos terapéuticos. Se estima que la capacidad instalada es de aproximadamente 164 MWt distribuidos en más de 160 sitios en 19 estados de la República. Estos recursos representan un aproximado de 12,939 t/h de agua caliente con una temperatura promedio de 50 °C.

Asimismo, es importante señalar que ya han existido algunos proyectos piloto, desarrollados por la CFE, sobre usos directos en los campos geotérmicos de Cerro Prieto, Los Azufres y Los Humeros, entre las cuales destacan: extracción secundaria de minerales en lagunas de evaporación; calefacción de oficinas e invernaderos, aplicaciones agrícolas en el secado de alimentos y madera; sin embargo, solo han sido pruebas y no se le ha dado la continuidad necesaria para el uso de la energía geotérmica a mayor escala, ya que la CFE se dedica a generar energía eléctrica, no a darle otro tipo de aplicación al recurso. De igual manera, se

han realizado trabajos de investigación con bombas de calor operadas con energía geotérmica para aplicaciones de refrigeración y purificación de efluentes industriales.

Nuestro país tiene una gran cantidad de recursos geotérmicos de baja entalpia, distribuidos en gran parte del territorio, los cuales no se les da la importancia que merece en México, y que podrían ser aprovechados de una mejor manera y con grandes beneficios.

2.5.3 Generación de energía eléctrica

Actualmente, México se encuentra en cuarto lugar a nivel mundial en capacidad geotermoeléctrica instalada, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 2. 2 Principales países con capacidad geotermoeléctrica instalada [Asociación Geotérmica Mexicana]

| POSICIÓN | PAÍS | MWe |
|----------|---------------|--------|
| 1 | Estado Unidos | 3151.5 |
| 2 | Filipinas | 1904.0 |
| 3 | Indonesia | 1197.3 |
| 4 | México | 958.0 |
| 5 | Italia | 882.5 |

En nuestro país se utilizan diferentes fuentes de energía para la generación eléctrica, sin embargo, el principal medio son los hidrocarburos, mientras que las energías renovables solo contribuyen en un bajo porcentaje, como en el caso específico de los recursos geotérmicos que es apenas el 2.52%. La siguiente gráfica muestra los tipos de fuentes y su porcentaje en la generación de energía eléctrica en México.

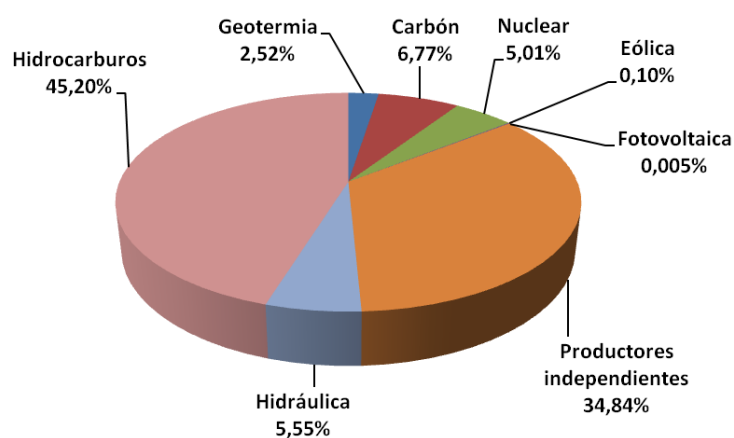


Figura 2. 11 Tipos de fuentes de energía y su porcentaje para la generación eléctrica en México. [Febrero 2013 CFE]

Los productores independientes son la segunda mayor fuente de generación de energía eléctrica en México, cuentan con 27 centrales, de las cuales 22 son de ciclo combinado y las 5 restantes son eoloelectricas.

Hay cinco campos geotérmicos identificados en México, cuatro de los cuales se encuentran bajo explotación con una capacidad total instalada de 955 MW netos, lo que representa casi el 2% de la capacidad eléctrica total del país operada por la CFE para el denominado servicio público de energía eléctrica. Tales campos son los siguientes:

- Cerro Prieto, Baja California, con 720 MW de capacidad neta, constituida por cuatro unidades de 110 MW cada una, cuatro unidades de 37.5 MW cada una, una unidad de baja presión de 30 MW y cuatro unidades más de 25 MW cada una. Todas las unidades son a condensación, de un solo flasheo, excepto las de 37.5 MW que son de doble flasheo. Las cuatro unidades más antiguas de 37.5 MW cada una se encuentran actualmente fuera de operación.

- Los Azufres, Michoacán, con 185 MW de capacidad neta, constituida por cinco unidades a condensación de flasheo sencillo (una de 50 MW y cuatro de 25 MW cada una) y siete unidades a contrapresión de 5 MW cada una. Actualmente se encuentra en construcción una unidad adicional de 50 MW.
- Los Humeros, Puebla, con 40 MW de capacidad, integrada por ocho unidades a contrapresión de 5 MW cada una. A fines de 2012 entró en operación comercial una unidad adicional de 25 MW, estando programada otra de la misma capacidad para el año 2013.
- Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, con 10 MW de capacidad constituida por dos unidades a condensación (flasheo simple) de 5 MW cada una.
- Cerritos Colorados, Jal., sin plantas en operación pero con varios pozos perforados y un potencial evaluado por la CFE en 75 MW.

Los Azufres, Los Humeros y Cerritos Colorados se encuentran en diferentes porciones de la Faja Volcánica Mexicana, mientras que Cerro Prieto y Las Tres Vírgenes se localizan en la península de Baja California.

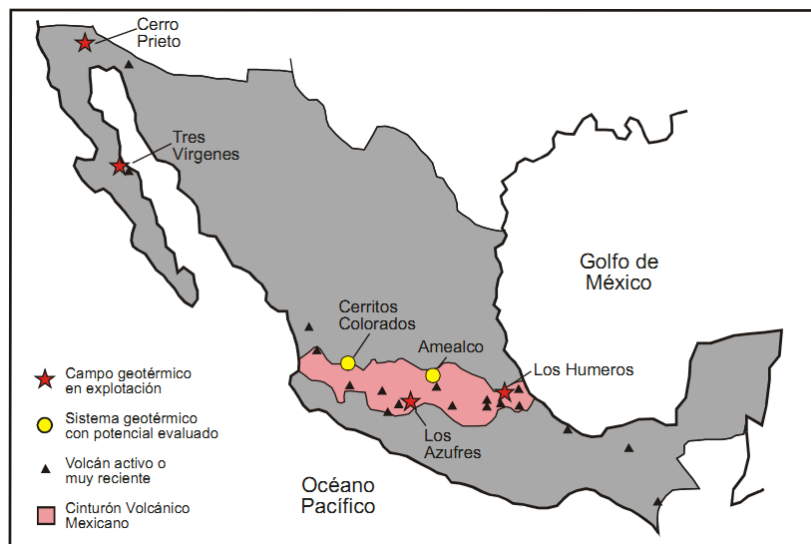


Figura 2. 12 Localización de campos geotérmicos de México actualmente en explotación, con potencial evaluado, el Cinturón Volcánico Mexicano y volcanes recientes o aún activos.

Actualmente la CFE, a través de su Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos con sede en la ciudad de Morelia, Michoacán, prácticamente ha concluido la construcción de dos unidades a condensación de 25 MW cada en el campo geotérmico de Los Humeros, que deberán entrar a operación en el transcurso de 2013. Con ello la capacidad geotermoeléctrica instalada en este campo llegará a 90 MW netos, pero la capacidad efectiva será de 75 MW toda vez que se planea dejar fuera de operación continua tres de las unidades a contrapresión de 5 MW que quedarán como respaldo.

Conclusiones del capítulo 2

Los recursos geotérmicos son una más de las cosas que nos proporciona la Tierra y se encuentran en diferentes partes del mundo. La energía que se puede obtener representa una solución viable a la demanda energética que se tiene actualmente, ya que hoy en día se busca dar otras alternativas y diversificar los combustibles.

Son diversas las aplicaciones que se le pueden dar, desde la generación de energía eléctrica, hasta los usos directos, donde no se necesitan temperaturas tan elevadas. Uno de los usos directos que en los últimos años ha aumentado y lo seguirá haciendo, son las bombas de calor, ya que son de gran utilidad para el acondicionamiento de hogares y edificios.

Nuestro país es privilegiado al estar situado en una zona con mucho potencial geotérmico, vulcanismo, movimiento tectónico, entre otros, lo que permite se presenten diferentes manifestaciones geotérmicas. Sin embargo, se ha explotado de una manera limitada este recurso, con respecto a la generación eléctrica, solo se cuenta con cuatro campos en funcionamiento, mientras que los usos directos prácticamente se destinan a la recreación como es la balneología.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LOS SISTEMAS TÉRMICOS DE DESALACIÓN CONVENCIONALES

En el capítulo siguiente se realiza el análisis energético de los sistemas MED, MSF y MVC convencionales, para ello se utiliza la información obtenida por el Proyecto IMPULSA IV del Instituto de Ingeniería en diferentes visitas efectuadas a plantas termoeléctricas que existen en el país, donde se tienen sistemas de desalación.

Con los datos recabados sobre las características físicas de los sistemas y los parámetros de funcionamiento, así como con las consideraciones adecuadas, se realiza la simulación en hoja de cálculo de los tres casos de interés para obtener mayor información que ayude a la comparación entre las tecnologías de desalación estudiadas.

Cada sistema tiene aspectos particulares que se toman en cuenta, sin embargo, en el estudio de las tres tecnologías se presentan cálculos que se consideran relevantes en todas, como el análisis térmico y eléctrico.

3.1 Análisis del sistema MED

El análisis energético 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.

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 cuando por medio de una bomba se 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 3.1 se muestra el esquema del sistema de desalación MED estudiado.

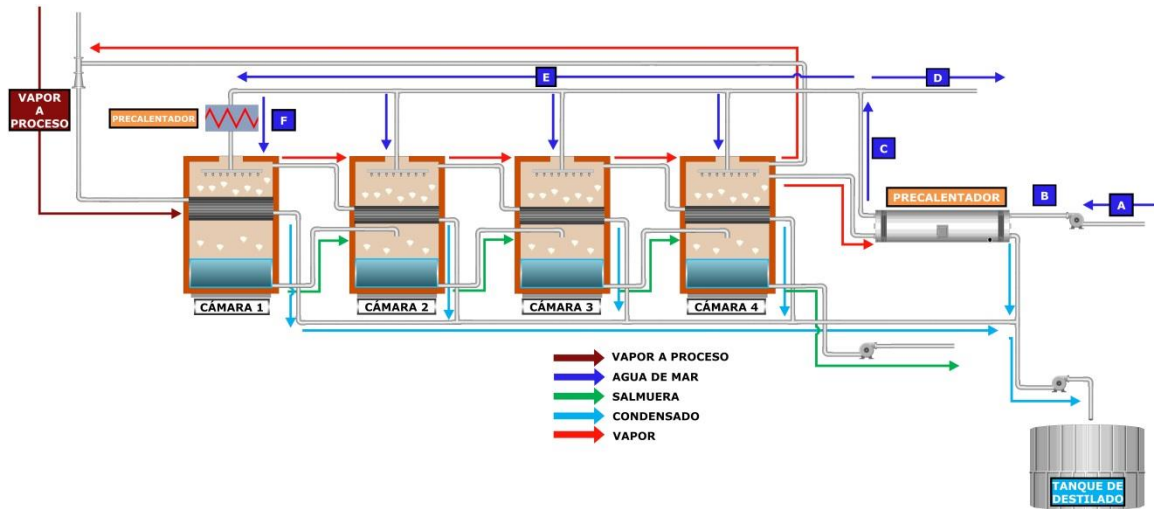


Figura 3. 1 Diagrama del sistema MED en la termoelectrica de Tuxpan

3.1.1 Análisis térmico

Para el análisis térmico del sistema MED, se realizó el estudio de cada una de las cámaras por separado, así como del precalentador de agua de mar, con esto se obtuvieron las ecuaciones de balance de masa y energía en los diferentes elementos del sistema.

Como primera parte se realiza un balance de masa del agua del sistema en general, la ecuación correspondiente es la siguiente:

$$\dot{m}_{am} = \dot{m}_d + \dot{m}_s \quad (3.1)$$

Dónde:

- \dot{m}_{am} = Gasto másico de agua de mar para el proceso
- \dot{m}_d = Gasto másico de destilado
- \dot{m}_s = Gasto másico de salmuera

De igual manera se hace un balance de concentración de sales, para ello se tiene la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{am} * X_{am} = \dot{m}_d * X_d + \dot{m}_s * X_s \quad (3.2)$$

Dónde:

- \dot{m}_{am} = Gasto másico de agua de mar para el proceso
- \dot{m}_d = Gasto másico de destilado
- \dot{m}_s = Gasto másico de salmuera
- X_i = Concentración de sales de cada flujo

La cantidad de sales que se tiene en el destilado es mínima, por lo cual se considera la concentración como cero ($X_d=0$).

De la ecuación anteriormente mencionada se obtiene un parámetro importante para los sistemas de desalación que es el Factor de Concentración (CF), definido como la relación de concentración de sales entre la salmuera y el agua de mar para el proceso:

$$CF = \frac{X_s}{X_{am}} \quad (3.3)$$

Dónde:

- CF = Factor de Concentración
- X_s = Concentración de sales de la salmuera
- X_{am} = Concentración de sales del agua de mar para el proceso

A continuación se presenta el análisis de cada componente y sus respectivas ecuaciones, las unidades empleadas para los flujos másicos están en [kg/s] y para las entalpias en [kJ/kg].

Cámara 1

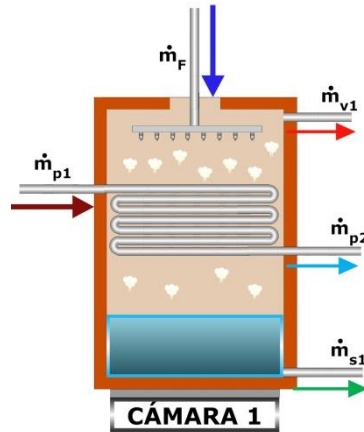


Figura 3. 2 Esquema de la primera cámara del sistema MED

Balances de masa:

$$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_{s1} = \dot{m}_F \quad (3.4)$$

$$\dot{m}_{p1} = \dot{m}_{p2} \quad (3.5)$$

Balance de energía:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{salida}$$

$$\dot{m}_{p1} * h_{p1} + \dot{m}_F * h_F = \dot{m}_{v1} * h_{v1} + \dot{m}_{s1} * h_{s1} + \dot{m}_{p2} * h_{p2} \quad (3.6)$$

Dónde:

- \dot{m}_{v1} = Gasto másico de vapor uno
- \dot{m}_{s1} = Gasto másico de salmuera uno
- \dot{m}_F = 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 = Entalpia 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

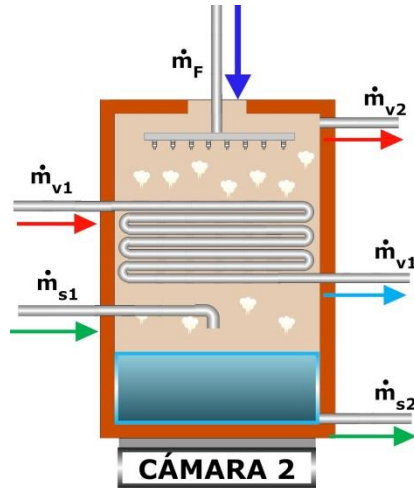


Figura 3. 3 Esquema de la segunda cámara del sistema MED

Balance de masa:

$$\dot{m}_{v2} + \dot{m}_{s2} = \dot{m}_F + \dot{m}_{s1} \quad (3.7)$$

Balance de energía:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{entrada} &= \dot{Q}_{salida} \\ \dot{m}_F * h_F + \dot{m}_{v1} * h_{v1} + \dot{m}_{s1} * h_{s1} &= \dot{m}_{v1} * h_{d1} + \dot{m}_{v2} * h_{v2} + \dot{m}_{s2} * h_{s2} \end{aligned} \quad (3.8)$$

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}_F = Gasto másico de agua de mar por cámara
- h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

Cámara 3

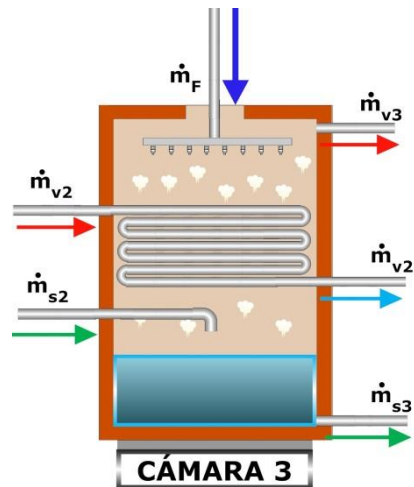


Figura 3. 4 Esquema de la tercera cámara del sistema MED

Balance de masa:

$$\dot{m}_{v3} + \dot{m}_{s3} = \dot{m}_F + \dot{m}_{s2} \quad (3.9)$$

Balance de energía:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{salida}$$

$$\dot{m}_F * h_F + \dot{m}_{v2} * h_{v2} + \dot{m}_{s2} * h_{s2} = \dot{m}_{v2} * h_{d2} + \dot{m}_{v3} * h_{v3} + \dot{m}_{s3} * h_{s3} \quad (3.10)$$

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}_F = Gasto másico de agua de mar por cámara
- h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

En el último efecto, que corresponde a la cuarta cámara se tiene una diferencia importante con respecto a las cámaras anteriores y es la extracción por parte del eyector de una fracción del vapor para generar el vacío que se requiere. El vapor restante es enviado al precalentador de agua de mar.

Cámara 4

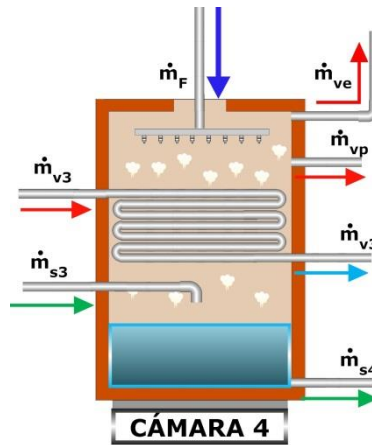


Figura 3. 5 Esquema de la cuarta cámara del sistema MED

Balances de masa:

$$\dot{m}_{vp} + \dot{m}_{ve} + \dot{m}_{s4} = \dot{m}_F + \dot{m}_{s3} \quad (3.11)$$

$$\dot{m}_{v4} = \dot{m}_{vp} + \dot{m}_{ve} \quad (3.12)$$

Balance de energía:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{salida}$$

$$\dot{m}_F * h_F + \dot{m}_{v3} * h_{v3} + \dot{m}_{s3} * h_{s3} = \dot{m}_{v3} * h_{d3} + \dot{m}_{v4} * h_{v4} + \dot{m}_{s4} * h_{s4} \quad (3.13)$$

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}_F = Gasto másico de agua de mar por cámara
 h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

La parte final del análisis que refiere al precalentador sólo involucra un balance de energía debido a que los flujos másicos que intervienen no se mezclan, simplemente existe una transferencia de energía que produce la condensación del vapor y el aumento de la temperatura del agua de mar de entrada.

Precalentador de agua de mar

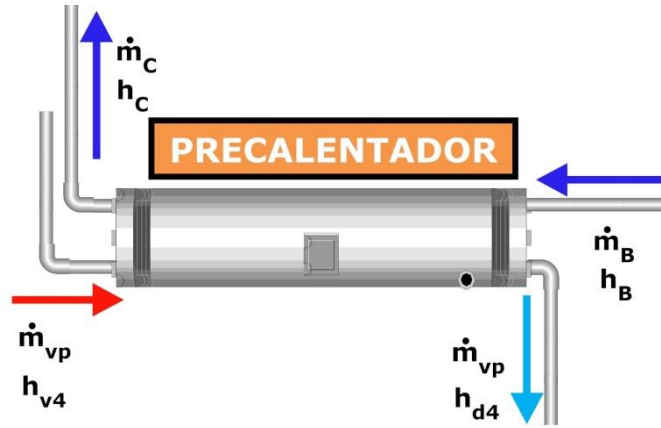


Figura 3. 6 Esquema del precalentador de agua de mar

Balance de energía

$$\dot{m}_{vp} * h_{v4} + \dot{m}_B * h_B = \dot{m}_{v4} * h_{d4} + \dot{m}_C * h_C \tag{3.14}$$

Dónde:

$\dot{m}_B = \dot{m}_C$ = Gasto másico de agua de mar inicial
 \dot{m}_{vp} = Gasto másico de vapor al precalentador de agua de mar
 h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

Con ésta última ecuación se puede calcular la temperatura del agua de mar a la salida del precalentador, teniendo como base que al encontrarse en estado líquido ésta se determina de la siguiente manera:

$$T_C = \frac{h_C}{c_p} \tag{3.15}$$

Dónde:

T_C = Temperatura del agua de mar a la salida del precalentador [°C]
 h_C = Entalpia del agua de mar a la salida del precalentador [kJ/kg]
 c_p = Calor específico del agua [kJ/kg K]

Rendimiento térmico: GOR

Para conocer el rendimiento térmico de los sistemas de desalación que utilizan vapor como fuente de calor, se emplea el parámetro GOR (relación de ganancia a la salida), que se define como la relación entre la cantidad total de agua destilada y la cantidad de vapor empleado para el proceso.

$$GOR = \frac{\dot{m}_{Td}}{\dot{m}_{p1}} \tag{3.16}$$

Dónde:

GOR = Rendimiento térmico
 \dot{m}_{Td} = Gasto másico total de destilado [m^3/h]
 \dot{m}_{p1} = Gasto másico de vapor a proceso [m^3/h]

3.1.2 Análisis eléctrico

Bombas para líquidos

Con respecto a la parte eléctrica, las bombas son los únicos elementos que utilizan éste tipo de energía en el sistema MED estudiado. La potencia consumida por una bomba para agua se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{W}_b = \frac{\dot{m} \cdot (P_{out} - P_{in})}{\eta_b \cdot 10} \quad (3.17)$$

Dónde:

\dot{W}_b = Potencia eléctrica consumida por la bomba [kW]
 \dot{m} = Gasto másico [kg/s]
 P_{in} = Presión a la entrada de la bomba [bar]
 P_{out} = Presión a la salida de la bomba [bar]
 η_b = Eficiencia de la bomba

Consumo eléctrico: CE

Como parte de los resultados, un parámetro importante en el análisis del sistema en general de desalación es el consumo eléctrico, el cual se define como la cantidad necesaria de energía eléctrica para producir un volumen dado. Las unidades que maneja son [kWh/m^3] y se calcula con la siguiente fórmula:

$$CE = \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_{Td}} \quad (3.18)$$

Dónde:

CE = Consumo eléctrico [kWh/m^3]
 \dot{W}_T = Potencia eléctrica total del sistema [kW]
 \dot{m}_{Td} = Gasto másico total de destilado [m^3/h]

3.1.3 Consideraciones y parámetros de funcionamiento

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 pura.
- 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 el 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 son los siguientes:

- Presión del agua de mar a la entrada: 1.01 [bar]
- Presión del agua de mar después de la bomba: 3 [bar]
- Temperatura del agua de mar: 35 [°C]
- Presión del agua de mar a la entrada de las cámaras: 1.45 [bar]
- Gasto total de agua de mar (\dot{m}_1): 750 [ton/hr]
- Gasto de agua de mar rechazado (\dot{m}_4): 600 [ton/hr]
- Salinidad del agua de mar: 37300 ppm
- Número de cámaras: 4
- Gasto de vapor a proceso (\dot{m}_p): 13.3 [ton/hr]
- Presión del vapor a proceso a la entrada de la primera cámara: 0.2 [bar]
- Temperatura del vapor a proceso a la entrada de la primera cámara: 101 [°C]
- Temperatura de condensado del vapor a proceso a la salida de la primera cámara: 60.66 [°C]
- Gasto de vapor extraído de la última cámara por el eyector: 6.2 [ton/hr]
- Presión del destilado después de la bomba: 2.75 [bar]
- Presión de la salmuera después de la bomba: 1.03 [bar]

Para el análisis completo del sistema, se programó en hoja de cálculo el proceso de desalación ocupando las ecuaciones anteriormente obtenidas, así como los parámetros de funcionamiento, esto se presenta en el anexo 1. Para las propiedades termodinámicas necesarias en los cálculos, se utilizó una librería para Excel de propiedades físicas de fluidos, llamada REFPROP.

3.2 Análisis del sistema MSF

Para realizar el análisis se tomó en cuenta la información obtenido por el Proyecto IMPULSA IV en una visita realizada a la planta termoeléctrica de Manzanillo, donde se tienen dos desaladoras tipo MSF.

El sistema MSF estudiado consta de ocho cámaras de evaporación, el sistema de vacío por medio de un eyector, el vapor a proceso, el intercambiador de calor entre dicho vapor y el agua de mar y tres bombas utilizadas para mover el agua de mar, el destilado y la salmuera.

El proceso comienza cuando al agua de mar se le aumenta considerablemente la presión por medio de una bomba para compensar las pérdidas que se producen en las tuberías, ya que pasa por varios precalentadores que se encuentran dentro de las cámaras de evaporación con la finalidad de condensar el vapor generado en cada una y aprovechar su energía pérdida en precalentar el agua de mar.

Una vez que el flujo ha pasado por todas las cámaras y ha sido precalentado, pasa a un intercambiador de calor donde el vapor a proceso es la principal fuente de energía térmica del sistema de desalación, con esto se logra aumentar la temperatura del agua de mar y al mismo tiempo condensar el vapor a proceso utilizado.

La presión que tienen las cámaras de evaporación son vacuométricas, con esto se logra que la temperatura de saturación del agua sea menor y se evapore una mayor cantidad. La presión disminuye proporcionalmente desde la primera cámara hasta la última. Después de que el agua de mar recibe la energía proporcionada por el vapor a proceso, presenta una temperatura mayor a la de saturación en la primera cámara, es por esto que al entrar dentro de ella se produce una evaporación instantánea o flash. El vapor que se genera es condensado y recolectado al entrar en contacto con el banco de tubos donde se precalienta el agua de mar, mientras tanto

el flujo que no se evapora, es decir, la salmuera que se genera pasa al segundo efecto como el flujo de entrada y se repite el proceso realizado en la primera cámara; esto mismo sucede en todos los efectos siguientes hasta que en el último efecto el flujo de destilado total es movido por una bomba a un tanque de almacenamiento, mientras que otra bomba se encarga de la salmuera.

En la figura 3.7 se muestra el esquema del sistema de desalación MSF en estudio.

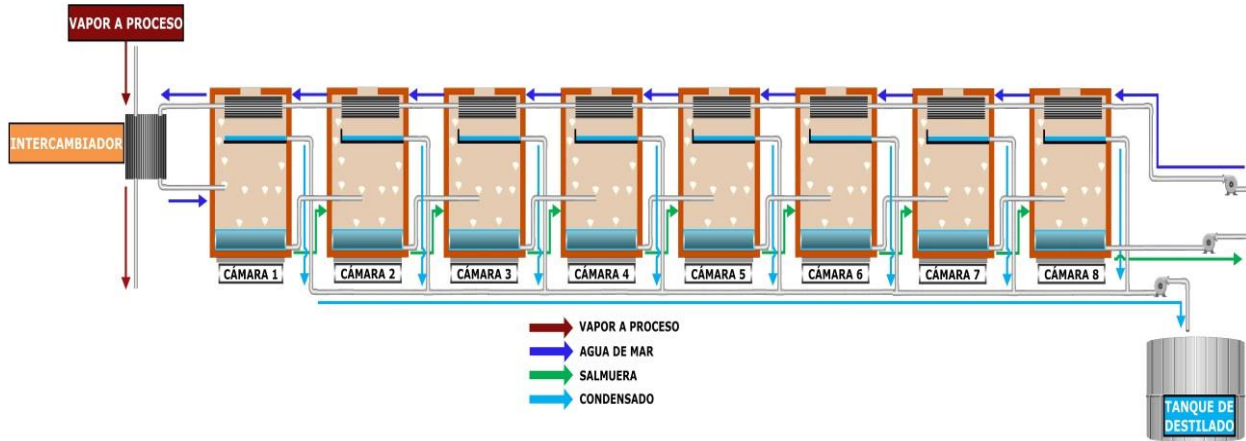


Figura 3. 7 Diagrama del sistema MSF en la termoeléctrica de Manzanillo

3.2.1 Análisis térmico

Primeramente se parte de un balance de masa del agua del sistema completo, para esto se ocupa la ecuación que a continuación se describe:

$$\dot{m}_{am} = \dot{m}_d + \dot{m}_s \quad (3.19)$$

Dónde:

- \dot{m}_{am} = Gasto másico de agua de mar para el proceso
- \dot{m}_d = Gasto másico de destilado
- \dot{m}_s = Gasto másico de salmuera

De la misma forma se hace un balance de concentración de sales, para ello se tiene la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{am} * X_{am} = \dot{m}_d * X_d + \dot{m}_s * X_s \quad (3.20)$$

Dónde:

- \dot{m}_{am} = Gasto másico de agua de mar para el proceso
- \dot{m}_d = Gasto másico de destilado
- \dot{m}_s = Gasto másico de salmuera
- X_i = Concentración de sales de cada flujo

Al ser poco significativa la cantidad de sales en el destilado, se considera la concentración como cero ($X_d=0$).

De la ecuación anteriormente descrita se determina el Factor de Concentración (CF) de la siguiente forma:

$$CF = \frac{X_s}{X_{am}} \quad (3.21)$$

Dónde:

- CF = Factor de Concentración
- X_s = Concentración de sales de la salmuera
- X_{am} = Concentración de sales del agua de mar para el proceso

Una parte primordial en el análisis del sistema MSF es el intercambiador de calor, debido a que este elemento lleva a cabo la transferencia de energía de la fuente de calor al agua de mar.

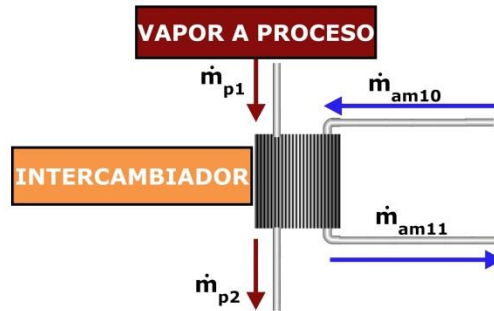


Figura 3. 8 Esquema del intercambiador de calor del sistema MSF

Balance de energía

$$\dot{m}_{p1} * h_{p1} + \dot{m}_{am10} * h_{am10} = \dot{m}_{p2} * h_{p2} + \dot{m}_{am11} * h_{am11} \quad (3.22)$$

Dónde:

- \dot{m}_{am10} = Gasto másico de agua de mar antes del intercambiador
- \dot{m}_{am11} = Gasto másico de agua de mar después del intercambiador
- \dot{m}_{p1} = Gasto másico de vapor a proceso
- \dot{m}_{p2} = Gasto másico del vapor a proceso condensado
- h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

Con respecto a las cámaras del sistema MSF, se efectúa un análisis en cada una de ellas por separado para obtener la calidad (x) de la mezcla vapor-agua. Para ejemplificar lo anterior se toma como elemento de análisis la primera cámara.

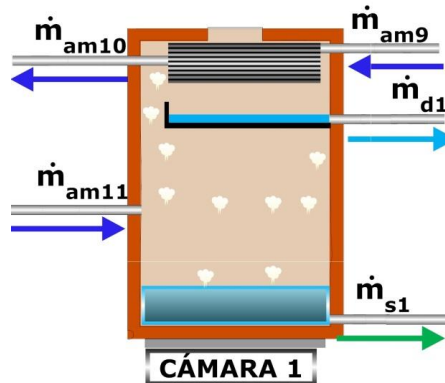


Figura 3. 9 Esquema de la primera cámara del sistema MSF

La ecuación para calcular la calidad (x) se presenta a continuación:

$$x_1 = \frac{h_{am11} - h_{f1}}{h_{g1} - h_{f1}} \quad (3.23)$$

Dónde:

- x_1 = Calidad en la primera cámara
- h_{am11} = Entalpia del agua antes de entrar a la primera cámara
- h_{f1} = Entalpia de líquido saturado a la presión de la primera cámara
- h_{g1} = Entalpia de vapor saturado a la presión de la primera cámara

Conociendo la calidad x_1 , se puede determinar la cantidad de vapor generado en la cámara, tomando en cuenta que la calidad se define como la razón entre la masa de vapor y la masa total de la mezcla:

$$x_1 = \frac{m_{v1}}{m_{am}} \quad (3.24)$$

Dónde:

- x_1 = Calidad en la primera cámara
- m_{v1} = Masa de vapor en la primera cámara
- m_{am} = Masa de agua de mar para el proceso en la primera cámara

Ya que se tiene la masa de vapor, para encontrar la masa de salmuera que sale de la primera cámara, se efectúa el balance de masa siguiente:

$$\dot{m}_{am} = \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{s1} \quad (3.25)$$

Dónde:

- \dot{m}_{am} = Gasto másico de agua de mar para el proceso
- \dot{m}_{v1} = Gasto másico de vapor de la primera cámara
- \dot{m}_{s1} = Gasto másico de salmuera de la primera cámara

El análisis para las cámaras subsecuentes es similar al anterior, teniendo en cuenta que la salmuera que sale de una cámara es el flujo de alimentación para el efecto siguiente.

Rendimiento térmico: GOR

Al igual que con el sistema MED, también se emplea el parámetro GOR para conocer el rendimiento térmico del proceso.

$$GOR = \frac{\dot{m}_{Td}}{\dot{m}_{p1}} \quad (3.26)$$

Dónde:

- GOR = Rendimiento térmico
- \dot{m}_{Td} = Gasto másico total de destilado [m^3/h]
- \dot{m}_{p1} = Gasto másico de vapor a proceso [m^3/h]

3.2.2 Análisis eléctrico

Bombas para líquidos

Para la configuración MSF, el análisis eléctrico es similar al realizado con el sistema MED, ya que los únicos dispositivos que necesitan energía eléctrica son las bombas. La potencia consumida por una bomba para agua se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{W}_b = \frac{\dot{m} \cdot (P_{out} - P_{in})}{\eta_b \cdot 10} \quad (3.27)$$

Dónde:

- \dot{W}_b = Potencia eléctrica consumida por la bomba [kW]

\dot{m} = Gasto másico [kg/s]
 P_{in} = Presión a la entrada de la bomba [bar]
 P_{out} = Presión a la salida de la bomba [bar]
 η_b = Eficiencia de la bomba

Consumo eléctrico: CE

Para el sistema MSF también se considera éste parámetro que ayuda en la comparación de resultados:

$$CE = \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_{Td}} \quad (3.28)$$

Dónde:

CE = Consumo eléctrico [kWh/m³]
 \dot{W}_T = Potencia eléctrica total del sistema [kW]
 \dot{m}_{Td} = Gasto másico total de destilado [m³/h]

3.2.3 Consideraciones y parámetros de funcionamiento

Las consideraciones tomadas para el análisis se enlistan a continuación:

- Para conocer las entalpias 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.
- Las tuberías que conducen el agua de mar, la salmuera y el vapor están perfectamente aisladas térmicamente para evitar pérdidas de calor.

De la planta MSF de Manzanillo se tienen los siguientes parámetros de funcionamiento:

Presión del agua de mar antes de la bomba: 1 [bar]
 Temperatura del agua de mar a la entrada de la bomba: 31.5 [°C]
 Presión del agua de mar después de la bomba: 4.7 [bar]
 Presión del agua de mar a la salida de los precalentadores: 2.82 [bar]
 Temperatura del agua de mar a la salida del último precalentador: 70 [°C]
 Pinch de acercamiento en los precalentadores entre el agua de mar y las cámaras: 5 [°C]
 Gasto de agua de mar (\dot{m}_a): 740 [Ton/hr]
 Salinidad del agua de mar: 35000 ppm
 Número de cámaras: 8
 Gasto del vapor a proceso (\dot{m}_p): 14.47 [Ton/hr]
 Presión del vapor a proceso a la entrada del intercambiador: 2.89 [bar]
 Temperatura del vapor a proceso a la entrada del intercambiador: 270 [°C]
 Presión del condensado a proceso a la salida del intercambiador: 2.4 [bar]

Temperatura del condensado a proceso a la salida del intercambiador: 87 [°C]
Presión del agua de mar a la salida del intercambiador: 0.64 [bar]
Presión en la primera cámara: 0.38 [bar]
Presión en la última cámara: 0.07 [bar]

Todo el análisis se simula en hoja de cálculo (Anexo 2) de la misma forma que con el sistema MED.

3.3 Análisis del sistema MVC

La información necesaria para realizar el análisis del sistema MVC es tomada de las unidades de desalación con ésta tecnología, que se encuentran en la central termoeléctrica Presidente Juárez, en Rosarito, Baja California.

El proceso de desalación por MVC inicia con el bombeo del agua de mar de alimentación para aumentar su presión, en seguida el flujo es dividido en dos partes iguales para que cada una pase a un intercambiador de calor diferente que funciona como precalentador del agua entrante al sistema, los fluidos que seden el calor son la salmuera rechazada y el destilado obtenido.

Después de los precalentadores, los flujos de agua de mar se junta nuevamente para formar uno sólo y pasar al desgasificador con la finalidad de condensar una fracción del vapor que sale del compresor y al mismo tiempo precalentar más el agua de alimentación.

El agua de mar que sale del desgasificador se mezcla con una porción de salmuera que sale del evaporador y que es recirculada. En seguida una bomba aumenta la presión del flujo para que entre por la parte superior del evaporador y sea rociado sobre el banco de tubos que hay en el interior y que conducen el vapor comprimido por el compresor.

El evaporador presenta una presión vacuométrica, con esto se obtiene una temperatura de saturación más baja y se logra evaporar mayor cantidad de agua.

El compresor succiona el vapor generado y lo hace pasar por los demister para eliminar las pequeñas gotas que arrastra, el flujo de vapor comprimido que sale del compresor es dividido en dos partes, la fracción principal es la que pasa por el interior del banco de tubos que están en el evaporador y que cede el calor para evaporar parte del agua rociada en el exterior de los tubos, mientras que la fracción restante es enviada al desgasificador mencionado con anterioridad.

En el banco de tubos del evaporador se condensa el vapor y el destilado obtenido se junta con el conseguido en el desgasificador; éste flujo y la salmuera que no se recircula son bombeados al precalentador correspondiente para ceder parte de la energía térmica que aún tienen.

En la figura 3.10 se muestra el esquema del sistema de desalación MVC estudiado.

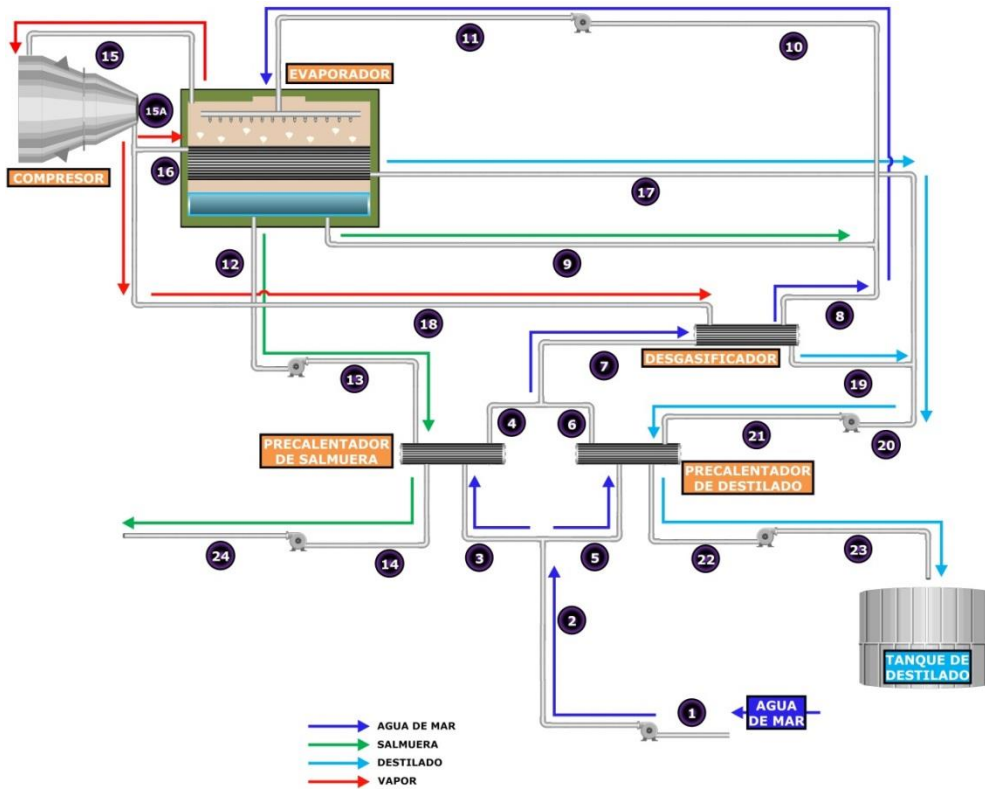


Figura 3. 10 Diagrama del sistema MVC en la termoeléctrica de Rosarito

3.3.1 Análisis térmico

Para éste sistema se hacen estudios individuales de los principales elementos que lo conforman, como primer análisis se hace un balance de masa de la planta de desalación completa, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{23} + \dot{m}_{24} \quad (3.29)$$

Dónde:

- \dot{m}_1 = Gasto másico de agua de mar
- \dot{m}_{24} = Gasto másico de salmuera
- \dot{m}_{23} = Gasto másico de destilado

A continuación se presenta los elementos más importantes que integran al sistema MVC analizado, así como las ecuaciones de los balances de masa y energía correspondientes a cada uno.

Evaporador:

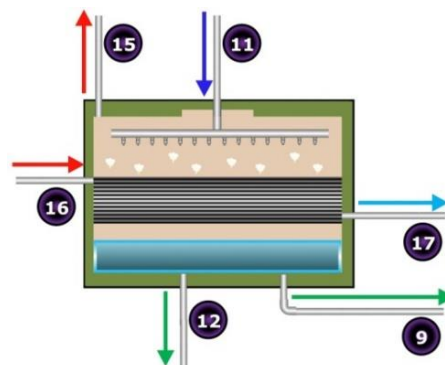


Figura 3. 11 Esquema del evaporador del sistema MVC

Balance de masa:

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{15} + \dot{m}_{12} + \dot{m}_9 \quad (3.30)$$

$$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17} \quad (3.31)$$

Dónde:

- \dot{m}_9 = Gasto másico de salmuera que se recircula
- \dot{m}_{11} = Gasto másico de agua de mar
- \dot{m}_{12} = Gasto másico de salmuera rechazada
- \dot{m}_{15} = Gasto másico de vapor
- \dot{m}_{16} = Gasto másico de vapor comprimido
- \dot{m}_{17} = Gasto másico de condensado del vapor comprimido

Balance de energía:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{salida}$$

$$\dot{m}_{11} * h_{11} + \dot{m}_{16} * h_{16} = \dot{m}_{15} * h_{15} + \dot{m}_{12} * h_{12} + \dot{m}_9 * h_9 + \dot{m}_{17} * h_{17} \quad (3.32)$$

Dónde:

- \dot{m}_9 = Gasto másico de salmuera que se recircula
- \dot{m}_{11} = Gasto másico de agua de mar
- \dot{m}_{12} = Gasto másico de salmuera rechazada
- \dot{m}_{15} = Gasto másico de vapor
- \dot{m}_{16} = Gasto másico de vapor comprimido
- \dot{m}_{17} = Gasto másico de condensado del vapor comprimido
- h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

Pre calentador con salmuera

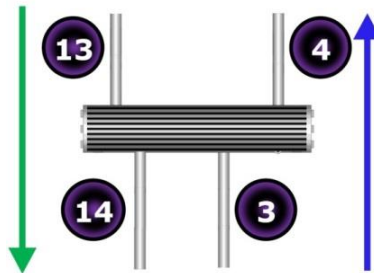


Figura 3. 12 Esquema del precalentador con salmuera

Balance de masa:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (3.33)$$

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} \quad (3.34)$$

Dónde:

- \dot{m}_3 = Gasto másico de agua de mar antes del precalentador
- \dot{m}_4 = Gasto másico de agua de mar después del precalentador
- \dot{m}_{13} = Gasto másico de salmuera antes del precalentador
- \dot{m}_{14} = Gasto másico de salmuera después del precalentador

Balance de energía:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{salida}$$

$$\dot{m}_3 * h_3 + \dot{m}_{13} * h_{13} = \dot{m}_4 * h_4 + \dot{m}_{14} * h_{14} \quad (3.35)$$

Dónde:

- \dot{m}_3 = Gasto másico de agua de mar antes del precalentador
- \dot{m}_4 = Gasto másico de agua de mar después del precalentador
- \dot{m}_{13} = Gasto másico de salmuera antes del precalentador
- \dot{m}_{14} = Gasto másico de salmuera después del precalentador
- h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

Precalentador con destilado

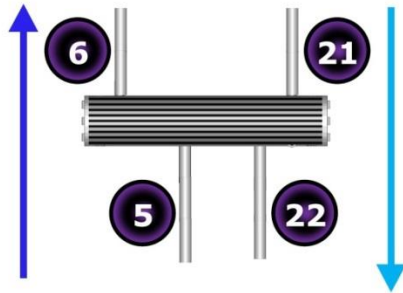


Figura 3. 13 Esquema del precalentador con destilado

Balance de masa:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \tag{3.36}$$

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{22} \tag{3.37}$$

Dónde:

- \dot{m}_5 = Gasto másico de agua de mar antes del precalentador
- \dot{m}_6 = Gasto másico de agua de mar después del precalentador
- \dot{m}_{21} = Gasto másico de destilado antes del precalentador
- \dot{m}_{22} = Gasto másico de destilado después del precalentador

Balance de energía:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{salida}$$

$$\dot{m}_5 * h_5 + \dot{m}_{21} * h_{21} = \dot{m}_6 * h_6 + \dot{m}_{22} * h_{22} \tag{3.38}$$

Dónde:

- \dot{m}_5 = Gasto másico de agua de mar antes del precalentador
- \dot{m}_6 = Gasto másico de agua de mar después del precalentador
- \dot{m}_{21} = Gasto másico de destilado antes del precalentador
- \dot{m}_{22} = Gasto másico de destilado después del precalentador
- h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

Desgasificador

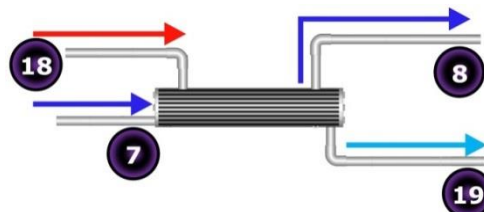


Figura 3. 14 Esquema del desgasificador

Balance de masa:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \tag{3.39}$$

$$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{19} \tag{3.40}$$

Dónde:

- \dot{m}_7 = Gasto másico de agua de mar antes del desgasificador
- \dot{m}_8 = Gasto másico de agua de mar después del desgasificador
- \dot{m}_{18} = Gasto másico de vapor comprimido
- \dot{m}_{19} = Gasto másico de condensado del vapor comprimido

Balance de energía:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{salida}$$

$$\dot{m}_7 * h_7 + \dot{m}_{18} * h_{18} = \dot{m}_8 * h_8 + \dot{m}_{19} * h_{19} \quad (3.41)$$

Dónde:

- \dot{m}_7 = Gasto másico de agua de mar antes del desgasificador
- \dot{m}_8 = Gasto másico de agua de mar después del desgasificador
- \dot{m}_{18} = Gasto másico de vapor comprimido
- \dot{m}_{19} = Gasto másico de condensado del vapor comprimido
- h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

3.3.2 Análisis eléctrico

Bombas para líquidos

Darle presión a los líquidos que se tienen requiere del uso de bombas, para conocer la potencia eléctrica que consume cada una se utiliza la ecuación que se presenta a continuación:

$$\dot{W}_b = \frac{\dot{m} * (P_{out} - P_{in})}{\eta_b * 10} \quad (3.42)$$

Dónde:

- \dot{W}_b = Potencia eléctrica consumida por la bomba [kW]
- \dot{m} = Gasto másico [kg/s]
- P_{in} = Presión a la entrada de la bomba [bar]
- P_{out} = Presión a la salida de la bomba [bar]
- η_b = Eficiencia de la bomba

Compresor

El sistema de desalación MVC a diferencia de los dos anteriores, tiene un compresor de vapor, su trabajo se asume como isoentrópico y se calcula con la siguiente ecuación:

$$W_c = \frac{\gamma * P_{in} * v_{in}}{\eta_{mec} * (\gamma - 1)} \left[\left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (3.43)$$

Dónde:

- W_c = Trabajo del compresor [kJ/kg]
- γ = Factor de compresibilidad isoentrópico
- v_{in} = Volumen específico a la entrada del compresor [m³/kg]
- P_{in} = Presión a la entrada del compresor [kPa]
- P_{out} = Presión a la salida del compresor [kPa]
- η_{mec} = Eficiencia mecánica del compresor

Sí al trabajo del compresor se le multiplica por el gasto másico de vapor se obtiene la potencia eléctrica que consume.

$$\dot{W}_c = \dot{m}_v * W_c \quad (3.44)$$

Dónde:

\dot{W}_c = Potencia eléctrica consumida por el compresor [kW]
 \dot{m}_v = Gasto másico de vapor [kg/s]
 W_c = Trabajo del compresor [kJ/kg]

Consumo eléctrico: CE

Éste parámetro es el principal para conocer el consumo energético del sistema MVC, debido a que durante su funcionamiento, no se tiene una fuente térmica externa. Para calcularlo se utiliza la siguiente ecuación:

$$CE = \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_{Td}} \quad (3.45)$$

Dónde:

CE = Consumo eléctrico [kWh/m³]
 \dot{W}_T = Potencia eléctrica total del sistema [kW]
 \dot{m}_{Td} = Gasto másico total de destilado [m³/h]

3.3.3 Consideraciones y parámetros de funcionamiento

Las consideraciones tomadas para el análisis se enlistan a continuación:

- Para conocer las entalpias del agua de mar en los diferentes puntos del sistema, se tomaron los datos de tablas de vapor considerándola como agua convencional.
- El evaporador está completamente aislado 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 el evaporador es el destilado que se obtiene.
- Las tuberías que conducen el agua de mar, la salmuera y el vapor están perfectamente aisladas térmicamente para evitar pérdidas de calor.

Con la información obtenida se enlistan los parámetros de funcionamiento:

Presión inicial del agua de mar: 1.013 [bar]
 Temperatura inicial del agua de mar a: 25 [°C]
 Aumento de presión con las bombas: 1.54 [bar]
 Disminución de presión en los intercambiadores de calor: 1 [bar]
 Gasto de agua de mar (\dot{m}_1): 68.8 [m³/hr]
 Salinidad del agua de mar: 35000 ppm
 Pinch de acercamiento en el precalentador entre el agua de mar y la salmuera: 5 [°C]
 Pinch de acercamiento en el precalentador entre el agua de mar y el destilado: 5 [°C]

Gasto de salmuera de recirculación: 182.3 [m³/hr]

Presión en el evaporador: 0.199 [bar]

Pinch de acercamiento en el desgasificador entre el agua de mar y el destilado: 10 [°C]

Finalmente se hace la simulación del proceso en una hoja de cálculo (Anexo 3) para obtener los resultados necesarios para realizar la comparación entre las tres tecnologías.

Después de hacer el análisis de cada uno de los sistemas de desalación estudiados, a continuación se presenta una tabla con los resultados que se consideran más importantes.

Tabla 3. 1 Comparación de resultados entre los sistemas de desalación convencionales

| | MED | MSF | MVC |
|--|-------|--------|--------|
| Agua de mar de alimentación [m ³ /hr] | 150 | 740 | 68.8 |
| Destilado [m ³ /hr] | 57.81 | 54.63 | 34.88 |
| % de desalación | 33.81 | 7.38 | 50.7 |
| Factor de concentración | 1.55 | 1.08 | 2.03 |
| GOR | 4.35 | 3.78 | - |
| Potencia eléctrica [kW] | 64.42 | 172.26 | 525.41 |
| Consumo eléctrico [kWh/m ³] | 1.11 | 3.13 | 15.06 |

Conclusiones del capítulo 3

El uso de plantas desaladoras de agua de mar en la industria es de gran ayuda cuando en la zona no se cuenta con los suficientes recursos hídricos que se demandan, como es el caso de una Central Termoeléctrica, donde el uso de grandes caudales de agua es fundamental para una correcta operación.

A pesar de que las tres tecnologías térmicas de desalación presentan el mismo principio básico para la obtención de destilado, el cual es la evaporación y después la condensación, existen ciertas consideraciones en cada uno que deben ser tomadas en cuenta en el análisis para no llegar a resultados erróneos.

Los resultados obtenidos no pueden ser comparados directamente, debido a que no se tienen los mismos datos de entrada, sin embargo, sí nos proporcionan información relevante, como es el porcentaje de desalación que se obtiene de cada uno de los sistemas, así como el consumo eléctrico, que es un parámetro importante para conocer la relación que existe entre la potencia eléctrica que se utiliza en el proceso y el destilado obtenido. Con base en esto se puede visualizar que el sistema MVC tiene un consumo eléctrico muy alto en comparación con los otros procesos, esto debido al uso de un compresor.

A pesar del alto consumo eléctrico del sistema MVC, es la tecnología que en términos generales tiene un mayor porcentaje de desalación, aunque esto también conlleva a que la salmuera que obtiene presente una alta salinidad que puede derivar en problemas de incrustaciones en los equipos.

Por último, otro de los parámetros que ayudan al análisis de los sistemas térmicos de desalación es el GOR, que proporciona una relación entre la cantidad de destilado que se adquiere y la de vapor necesario para el proceso, en el caso de los sistemas MED y MSF es posible determinarla, sin embargo para el MVC no se puede, ya que una vez en operación, el compresor proporciona el vapor requerido para que el sistema funcione.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LOS SISTEMAS TÉRMICOS DE DESALACIÓN UTILIZANDO RECURSO GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPIA

En este cuarto capítulo se efectúa el análisis energético de los tres sistemas de desalación, pero con la variante de sustituir la principal fuente de calor de cada tecnología por energía suministrada por el recurso geotérmico de baja entalpia.

El análisis de los casos de estudio realizados en el tercer capítulo ayuda a conocer las características particulares de cada sistema, así como parámetros importantes para llevar a cabo un nuevo análisis energético pero considerando energía geotérmica en cada uno. Para visualizar de una mejor manera los resultados y poder realizar una comparación entre dichos sistemas, se efectúa la simulación de cada uno con ayuda de una hoja de cálculo.

4.1 Análisis del sistema MED con recurso geotérmico (MED-LE)

El sistema llamado MED-LE (Multi Effect Distillation Low Enthalpy) es un modelo que fue propuesto por el Proyecto IMPULSA IV del Instituto de Ingeniería UNAM y es una variante del sistema convencional MED.

Se han realizado diversos estudios para determinar los componentes que forman al sistema MED-LE, sus características físicas y su principio de funcionamiento, entre los elementos que destacan están los siguientes: tres cámaras de evaporación y una de condensación, un sistema de vacío generado por eyectores de aire comprimido, uso del recurso geotérmico de baja entalpia como fuente de calor y las bombas para mover los diferentes líquidos que se tienen.

El principio de funcionamiento es similar a la tecnología MED convencional, la principal diferencia es que el recurso geotérmico después de ceder calor en el primer efecto, sigue ocupándose en los efectos subsecuentes para aprovechar la energía térmica que aún tiene el fluido, una vez que el recurso geotérmico sale de la tercera cámara, es reinyectado al suelo como se observa en la figura 4.1.

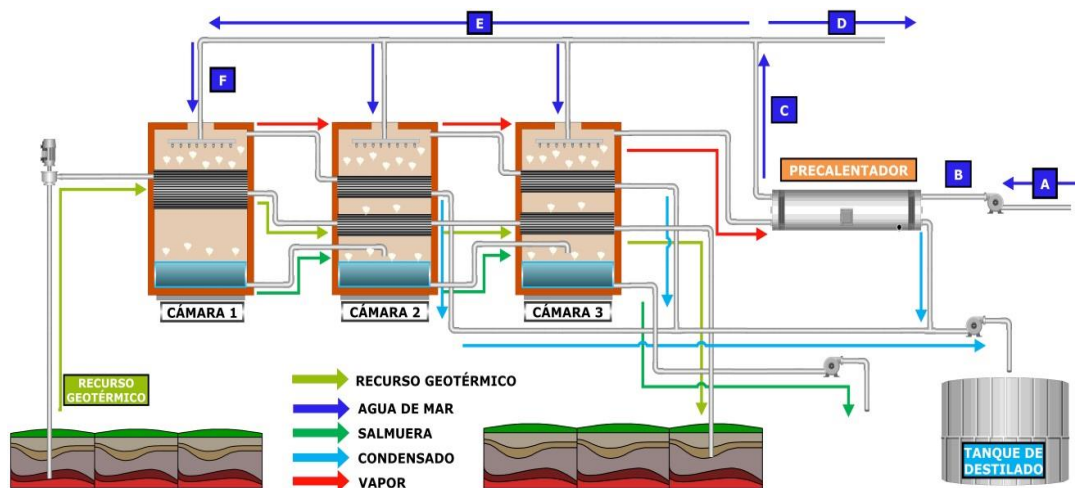


Figura 4. 1 Diagrama del sistema MED-LE

4.1.1 Análisis térmico

De igual manera que con el sistema MED convencional, se lleva a cabo un análisis de las cámaras por separado para obtener las ecuaciones de balance de masa y energía.

Considerando al sistema completo se efectúa un balance de masa del agua que entra a las cámaras, para lo cual se ocupa la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{am} = \dot{m}_d + \dot{m}_s \quad (4.1)$$

Dónde:

- \dot{m}_{am} = Gasto másico de agua de mar para el proceso
- \dot{m}_d = Gasto másico de destilado
- \dot{m}_s = Gasto másico de salmuera

También se realiza el balance de concentración de sales con la ecuación que se presenta a continuación:

$$\dot{m}_{am} * X_{am} = \dot{m}_d * X_d + \dot{m}_s * X_s \quad (4.2)$$

Dónde:

- \dot{m}_{am} = Gasto másico de agua de mar para el proceso
- \dot{m}_d = Gasto másico de destilado
- \dot{m}_s = Gasto másico de salmuera
- X_i = Concentración de sales de cada flujo

Se considera que la cantidad de sales que se tiene en el destilado es casi nula, por lo cual se toma como dato que la concentración es igual a cero ($X_d=0$).

Con los valores de concentración de sales se calcula el Factor de Concentración (CF):

$$CF = \frac{X_s}{X_{am}} \quad (4.3)$$

Dónde:

- CF = Factor de Concentración
- X_s = Concentración de sales de la salmuera
- X_{am} = Concentración de sales del agua de mar para el proceso

Para conocer los resultados que se obtienen de la simulación, primero se realiza el análisis de cada componente usando las ecuaciones fundamentales de la primera Ley de la Termodinámica, para esto las unidades utilizadas para los flujos másicos están en [kg/s] y para las entalpías en [kJ/kg].

Cámara 1

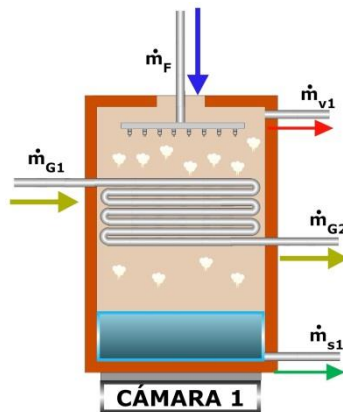


Figura 4. 2 Esquema de la primera cámara del sistema MED-LE

Balances de masa:

$$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_{s1} = \dot{m}_F \quad (4.4)$$

$$\dot{m}_{G1} = \dot{m}_{G2} \quad (4.5)$$

Balance de energía:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{salida}$$

$$\dot{m}_{G1} * h_{G1} + \dot{m}_F * h_F = \dot{m}_{v1} * h_{v1} + \dot{m}_{s1} * h_{s1} + \dot{m}_{G2} * h_{G2} \quad (4.6)$$

Dónde:

- \dot{m}_{v1} = Gasto másico de vapor uno
- \dot{m}_{s1} = Gasto másico de salmuera uno
- \dot{m}_F = Gasto másico de agua de mar por cámara
- \dot{m}_{G1} = Gasto másico de recurso geotérmico
- h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

En el segundo y tercer efecto, se lleva a cabo el mismo análisis considerando como fuentes de calor al vapor generado en la cámara anterior y al mismo recurso geotérmico utilizado. También se toma en cuenta la salmuera que sale del efecto anterior y que entra al siguiente.

Cámara 2

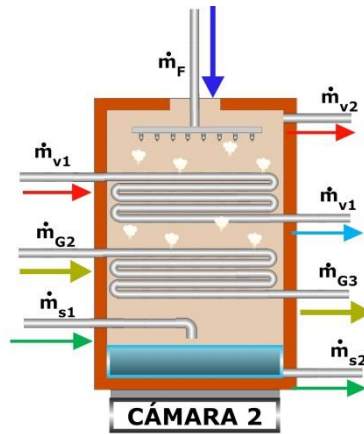


Figura 4. 3 Esquema de la segunda cámara del sistema MED-LE

Balance de masa:

$$\dot{m}_{v2} + \dot{m}_{s2} = \dot{m}_F + \dot{m}_{s1} \quad (4.8)$$

$$\dot{m}_{G2} = \dot{m}_{G3} \quad (4.9)$$

Balance de energía:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{salida}$$

$$\dot{m}_F * h_F + \dot{m}_{v1} * h_{v1} + \dot{m}_{s1} * h_{s1} + \dot{m}_{G2} * h_{G2} = \dot{m}_{v1} * h_{d1} + \dot{m}_{v2} * h_{v2} + \dot{m}_{s2} * h_{s2} + \dot{m}_{G3} * h_{G3} \quad (4.10)$$

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}_F = Gasto másico de agua de mar por cámara
- \dot{m}_{G2} = Gasto másico de recurso geotérmico
- h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

Cámara 3

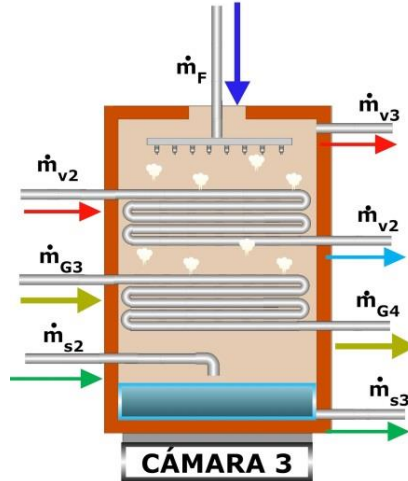


Figura 4. 4 Esquema de la tercera cámara del sistema MED-LE

Balance de masa:

$$\dot{m}_{v3} + \dot{m}_{s3} = \dot{m}_F + \dot{m}_{s2} \quad (4.11)$$

$$\dot{m}_{G3} = \dot{m}_{G4} \quad (4.12)$$

Balance de energía:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{salida}$$

$$\dot{m}_F * h_F + \dot{m}_{v2} * h_{v2} + \dot{m}_{s2} * h_{s2} + \dot{m}_{G3} * h_{G3} = \dot{m}_{v2} * h_{d2} + \dot{m}_{v3} * h_{v3} + \dot{m}_{s3} * h_{s3} + \dot{m}_{G4} * h_{G4} \quad (4.13)$$

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}_F = Gasto másico de agua de mar por cámara
- \dot{m}_{G3} = Gasto másico de recurso geotérmico
- h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

Como última parte del análisis térmico se tiene al precalentador de agua de mar y que sirve como condensador del último efecto del sistema MED-LE.

Precalentador de agua de mar

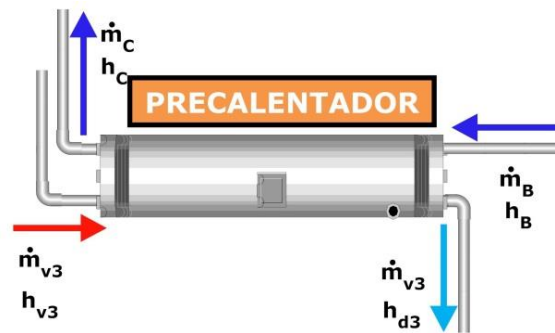


Figura 4. 5 Esquema del precalentador de agua de mar del sistema MED-LE

Balance de energía

$$\dot{m}_{v3} * h_{v3} + \dot{m}_B * h_B = \dot{m}_{v3} * h_{d3} + \dot{m}_C * h_C \quad (4.14)$$

Dónde:

$\dot{m}_B = \dot{m}_C$ = Gasto másico de agua de mar inicial
 \dot{m}_{v3} = Gasto másico de vapor al precalentador de agua de mar
 h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

Rendimiento térmico: PR

Como un punto de comparación entre los sistemas térmicos de desalación con energía geotérmica se utiliza la relación de rendimiento PR (Performance Ratio), también denominado rendimiento térmico, para conocer la cantidad de agua destilada por unidad de energía térmica.

$$PR = \frac{\dot{m}_{Td}}{\dot{Q}_{sum}} \quad (4.15)$$

Dónde:

PR = Rendimiento térmico [kg/MJ]
 \dot{m}_{Td} = Gasto másico total de destilado [kg/s]
 \dot{Q}_{sum} = Tasa de transferencia de calor para el proceso [MJ/s]

4.1.2 Análisis eléctrico

Bombas para líquidos

Para el sistema MED-LE, se requieren tres equipos de bombeo, donde la potencia eléctrica se determina de la siguiente forma:

$$\dot{W}_b = \frac{\dot{m} \cdot (P_{out} - P_{in})}{\eta_b \cdot 10} \quad (4.16)$$

Dónde:

\dot{W}_b = Potencia eléctrica consumida por la bomba [kW]
 \dot{m} = Gasto másico [kg/s]
 P_{in} = Presión a la entrada de la bomba [bar]
 P_{out} = Presión a la salida de la bomba [bar]
 η_b = Eficiencia de la bomba

Consumo eléctrico: CE

Éste parámetro es de gran importancia para conocer la energía eléctrica que se consume al obtener un cierto volumen de destilado, se calcula con la ecuación que a continuación se presenta:

$$CE = \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_{Td}} \quad (4.17)$$

Dónde:

CE = Consumo eléctrico [kWh/m³]
 \dot{W}_T = Potencia eléctrica total del sistema [kW]
 \dot{m}_{Td} = Gasto másico total de destilado [m³/h]

4.1.3 Consideraciones y parámetros de funcionamiento

Dentro de las consideraciones asumidas para el análisis, están las siguientes:

- Para el agua de mar y el recurso geotérmico de baja entalpia, ambos se consideran como agua standard para obtener las propiedades termodinámicas de los datos de tablas de vapor.
- Las cámaras están completamente aisladas térmicamente para evitar la 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.
- Las tuberías que conducen el agua de mar, la salmuera, el vapor y el recurso geotérmico están perfectamente aisladas térmicamente para evitar pérdidas de calor.

Con respecto a los parámetros de funcionamiento, los datos se presentan a continuación:

- Presión del agua de mar a la entrada: 1.013 [bar]
- Presión del agua de mar después de la bomba: 2.413 [bar]
- Temperatura del agua de mar: 25 [°C]
- Presión del agua de mar a la entrada de las cámaras: 1.013 [bar]
- Gasto total de agua de mar (\dot{m}_A): 1.067 [kg/s]
- Gasto de agua de mar rechazado (\dot{m}_D): 0.437 [kg/s]
- Gasto de agua de mar al proceso (\dot{m}_E): 0.63 [kg/s]
- Salinidad del agua de mar: 35000 ppm
- Número de cámaras: 3
- Gasto del recurso geotérmico (\dot{m}_G): 0.576 [kg/s]
- Presión del recurso geotérmico a la entrada de la primera cámara: 2 [bar]
- Temperatura del recurso geotérmico a la entrada de la primera cámara: 85 [°C]
- Pinch de acercamiento en la cámara entre el recurso geotérmico y el agua de mar: 3[°C]
- Caída de presión del recurso geotérmico en las cámaras: 0.35 [bar]
- Presión del destilado después de la bomba: 2.5 [bar]
- Presión de la salmuera después de la bomba: 1.5 [bar]

Tomando en cuenta los análisis anteriormente descritos, así como las consideraciones y los parámetros de funcionamiento, se programa en hoja de cálculo todo el proceso para realizar el análisis completo del sistema MED-LE. Esto con la ayuda de la librería REFPROP de propiedades físicas de fluidos. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en el anexo 4.

4.2 Análisis del sistema MSF con recurso geotérmico

Para realizar la comparación entre éste sistema y los otros, se consideran los datos de los equipos de la tecnología MED-LE, debido a que el grupo IIIDEA del Instituto de Ingeniería UNAM tiene en estudio a éste proyecto, y del cual se tiene información de sus parámetros de funcionamiento.

La única variante que presenta el sistema MSF con recurso geotérmico con respecto a uno convencional, es cambiar el vapor externo como fuente principal de energía por líquido geotérmico de baja entalpia.

Con respecto a la configuración, se utilizan sólo tres cámaras de evaporación para que sea factible la comparación con la tecnología MED-LE, En la figura 4.6 se presenta el sistema.

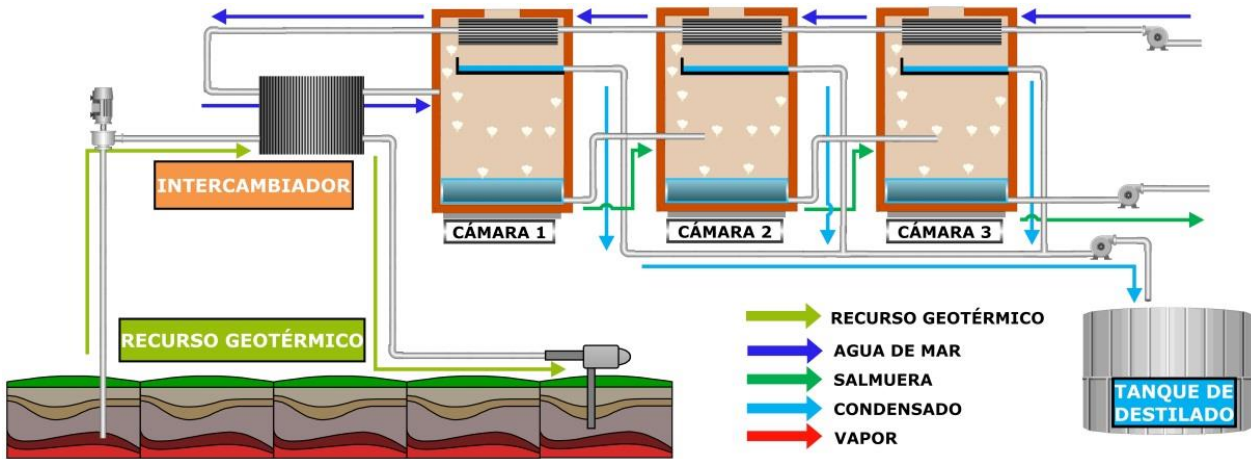


Figura 4. 6 Diagrama del sistema MSF con recurso geotérmico

4.2.1 Análisis térmico

Como parte fundamental para el análisis se realiza el balance de masa del agua de mar del sistema completo, por medio de la presente ecuación:

$$\dot{m}_{am} = \dot{m}_d + \dot{m}_s \quad (4.18)$$

Dónde:

- \dot{m}_{am} = Gasto másico de agua de mar para el proceso
- \dot{m}_d = Gasto másico de destilado
- \dot{m}_s = Gasto másico de salmuera

Otra ecuación importante sería la de balance de concentración de sales:

$$\dot{m}_{am} * X_{am} = \dot{m}_d * X_d + \dot{m}_s * X_s \quad (4.19)$$

Dónde:

- \dot{m}_a = Gasto másico de agua de mar para el proceso
- \dot{m}_d = Gasto másico de destilado
- \dot{m}_s = Gasto másico de salmuera
- X_i = Concentración de sales de cada flujo

Para el caso del destilado, se considera muy pequeña la cantidad de sales, por lo tanto la concentración se toma como cero ($X_d=0$).

Contemplando las cantidades de concentración de sales, se obtiene el Factor de Concentración (CF) con la siguiente ecuación:

$$CF = \frac{X_s}{X_{am}} \quad (4.20)$$

Dónde:

- CF = Factor de Concentración
- X_s = Concentración de sales de la salmuera
- X_{am} = Concentración de sales del agua de mar para el proceso

En las cámaras de evaporación se produce un cambio de fase de un porcentaje del agua de mar que entra, para conocer la cantidad es necesario determinar la calidad (x) que se tiene de la mezcla vapor-agua. En la figura 4.7 se muestra el esquema de la primera cámara, así como de los flujos másicos que intervienen.

Debido a la similitud entre las tres cámaras, a continuación sólo se presenta el análisis para el primer efecto.

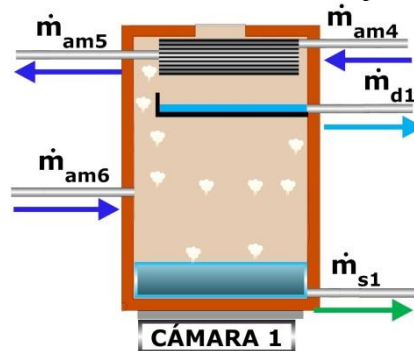


Figura 4. 7 Esquema de la primera cámara del sistema MSF con recurso geotérmico

La obtención de la calidad (x) se hace por medio de la ecuación que a continuación aparece:

$$x_1 = \frac{h_{am6} - h_{f1}}{h_{g1} - h_{f1}} \quad (4.21)$$

Dónde:

- x_1 = Calidad en la primera cámara
- h_{am6} = Entalpia del agua antes de entrar a la primera cámara
- h_{f1} = Entalpia de líquido saturado a la presión de la primera cámara
- h_{g1} = Entalpia de vapor saturado a la presión de la primera cámara

Una vez determinada la calidad x_1 , así como conociendo su definición, se obtiene el flujo de vapor que se produce en la cámara, esto se expresa en la siguiente ecuación:

$$x_1 = \frac{\dot{m}_{v1}}{\dot{m}_{am}} \quad (4.22)$$

Dónde:

- x_1 = Calidad en la primera cámara
- \dot{m}_{v1} = Gasto másico de vapor en la primera cámara
- \dot{m}_{am} = Gasto másico de agua de mar para el proceso en la primera cámara

Para obtener el flujo de salmuera que se rechaza de la primera cámara, se hace el siguiente balance de masa:

$$\dot{m}_{am} = \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{s1} \quad (4.23)$$

Dónde:

- \dot{m}_{am} = Gasto másico de agua de mar para el proceso
- \dot{m}_{v1} = Gasto másico de vapor de la primera cámara
- \dot{m}_{s1} = Gasto másico de salmuera de la primera cámara

La salmuera que sale de la cámara es introducida en la siguiente como el flujo de alimentación.

Rendimiento térmico: PR

De igual forma que con la tecnología MED-LE, se utiliza el parámetro de relación de rendimiento PR (Performance Ratio) para evaluar el rendimiento térmico del sistema.

$$PR = \frac{\dot{m}_{Td}}{\dot{Q}_{sum}} \quad (4.24)$$

Dónde:

PR = Rendimiento térmico [kg/MJ]
 \dot{m}_{Td} = Gasto másico total de destilado [kg/s]
 \dot{Q}_{sum} = Tasa de transferencia de calor para el proceso [MJ/s]

4.2.2 Análisis eléctrico

Bombas para líquidos

La ecuación utilizada para calcular la potencia que consume una bomba se expresa de la siguiente forma:

$$\dot{W}_b = \frac{\dot{m}*(P_{out}-P_{in})}{\eta_b*10} \quad (4.25)$$

Dónde:

\dot{W}_b = Potencia eléctrica consumida por la bomba [kW]
 \dot{m} = Gasto másico [kg/s]
 P_{in} = Presión a la entrada de la bomba [bar]
 P_{out} = Presión a la salida de la bomba [bar]
 η_b = Eficiencia de la bomba

Consumo eléctrico: CE

Al efectuar la comparativa energética entre los sistemas, es necesario conocer éste parámetro.

$$CE = \frac{P_T}{\dot{m}_{Td}} \quad (4.26)$$

Dónde:

CE = Consumo eléctrico [kWh/m³]
 P_T = Potencia eléctrica total del sistema [kW]
 \dot{m}_{Td} = Gasto másico total de destilado [m³/h]

4.2.3 Consideraciones y parámetros de funcionamiento

Dentro de las consideraciones asumidas para el análisis, están las siguientes:

- Para el agua de mar y el recurso geotérmico de baja entalpia, ambos se consideran como agua pura para obtener las propiedades termodinámicas de los datos de tablas de vapor.

- Las cámaras están completamente aisladas térmicamente para evitar la 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.
- Las tuberías que conducen el agua de mar, la salmuera, el vapor y el recurso geotérmico están perfectamente aisladas térmicamente para evitar pérdidas de calor.

Con respecto a los parámetros de funcionamiento, los datos se presentan a continuación:

Presión del agua de mar antes de la bomba: 1.013 [bar]
Temperatura del agua de mar a la entrada de la bomba: 25 [°C]
Presión del agua de mar después de la bomba: 2.413 [bar]
Caída de presión del agua de mar por cada precalentador: 0.35 [bar]
Pinch de acercamiento en los precalentadores entre el agua de mar y las cámaras: 5 [°C]
Gasto de agua de mar (\dot{m}_a): 0.63 [kg/s]
Salinidad del agua de mar: 35000 ppm
Número de cámaras: 3
Gasto del recurso geotérmico (\dot{m}_p): 0.576 [kg/s]
Presión del recurso geotérmico a la entrada del intercambiador: 2 [bar]
Temperatura del recurso geotérmico a la entrada del intercambiador: 85 [°C]
Caída de presión del recurso geotérmico en el intercambiador: 1 [bar]
Pinch de acercamiento entre el agua de mar y el recurso geotérmico: 3 [°C]
Presión en la primera cámara: 0.156 [bar]
Presión en la última cámara: 0.101 [bar]
Presión después de la bomba de destilado: 2.5 [bar]
Presión después de la bomba de salmuera: 1.5 [bar]

Con ayuda de los parámetros antes descritos y de las consideraciones tomadas, se realiza la simulación en hoja de cálculo. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en el anexo 5.

4.3 Análisis del sistema MVC con recurso geotérmico

A diferencia de la tecnología MVC convencional estudiada en el capítulo anterior, en éste caso de análisis se plantea agregar un nuevo subsistema que consta de un intercambiador, con el cual se calienta agua de mar con la energía del recurso geotérmico, para después sumar este flujo de agua de mar calentada al que sale precalentado del desgasificador.

Con respecto a la configuración del resto del sistema, no se presenta modificación alguna y se mantiene igual al analizado en el tercer capítulo, esto se puede observar en la figura 4.8.

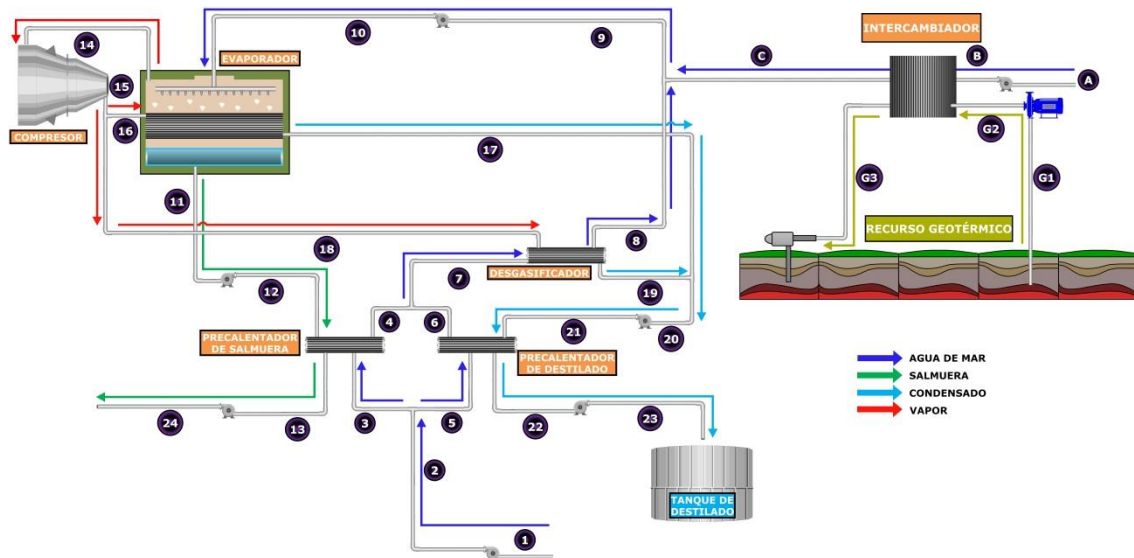


Figura 4. 8 Diagrama del sistema MVC con recurso geotérmico

4.3.1 Análisis térmico

Debido a que sólo se agrega un subsistema a la configuración original, a continuación se presenta el análisis del equipo complementario, el cual es un intercambiador de calor de placas entre el recurso geotérmico y el flujo secundario de agua de mar.

Intercambiador

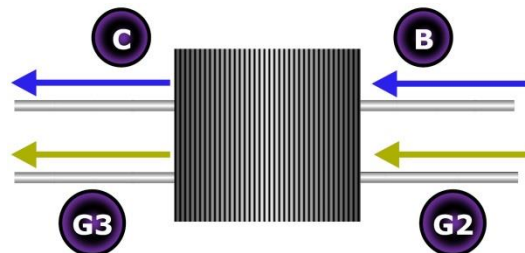


Figura 4. 9 Esquema del intercambiador de calor de placas

Balance de masa:

$$\dot{m}_B = \dot{m}_C \quad (4.27)$$

$$\dot{m}_{G2} = \dot{m}_{G3} \quad (4.28)$$

Dónde:

\dot{m}_B = Gasto másico del flujo secundario de agua de mar

\dot{m}_{G2} = Gasto másico del recurso geotérmico

Balance de energía:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{salida}$$

$$\dot{m}_{G2} * h_{G2} + \dot{m}_B * h_B = \dot{m}_{G3} * h_{G3} + \dot{m}_C * h_C \quad (4.29)$$

Dónde:

\dot{m}_B = Gasto másico del flujo secundario de agua de mar

\dot{m}_{G2} = Gasto másico del recurso geotérmico

h_i = Entalpia a las condiciones del fluido correspondiente

3.3.2 Análisis eléctrico

Bombas para líquidos

La ecuación para el cálculo de la potencia eléctrica consumida es la siguiente:

$$\dot{W}_b = \frac{\dot{m}*(P_{out}-P_{in})}{\eta_b*10} \quad (4.30)$$

Dónde:

- \dot{W}_b = Potencia eléctrica consumida por la bomba [kW]
- \dot{m} = Gasto másico [kg/s]
- P_{in} = Presión a la entrada de la bomba [bar]
- P_{out} = Presión a la salida de la bomba [bar]
- η_b = Eficiencia de la bomba

Compresor

Para el caso del compresor de vapor, su trabajo se obtiene con la ecuación que a continuación se presenta:

$$W_c = \frac{\gamma * P_{in} * v_{in}}{\eta_{mec} * (\gamma - 1)} \left[\left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (4.31)$$

Dónde:

- W_c = Trabajo del compresor [kJ/kg]
- γ = Factor de compresibilidad isoentrópico
- v_{in} = Volumen específico a la entrada del compresor [m³/kg]
- P_{in} = Presión a la entrada del compresor [kPa]
- P_{out} = Presión a la salida del compresor [kPa]
- η_{mec} = Eficiencia mecánica del compresor

Al multiplicar el flujo másico de vapor por el resultado obtenido en la ecuación anterior, se obtiene la potencia eléctrica consumida.

$$\dot{W}_c = \dot{m}_v * W_c \quad (4.32)$$

Dónde:

- \dot{W}_c = Potencia eléctrica consumida por el compresor [kW]
- \dot{m}_v = Gasto másico de vapor [kg/s]
- W_c = Trabajo del compresor [kJ/kg]

Consumo eléctrico: CE

Como parámetro comparativo se recurre de igual forma que con los sistemas anteriores al consumo eléctrico:

$$CE = \frac{P_T}{\dot{m}_{Td}} \quad (4.33)$$

Dónde:

CE = Consumo eléctrico [kWh/m³]
 P_T = Potencia eléctrica total del sistema [kW]
 \dot{m}_{Td} = Gasto másico total de destilado [m³/h]

4.3.3 Consideraciones y parámetros de funcionamiento

Dentro de las consideraciones asumidas para el análisis, están las siguientes:

- Para el agua de mar y el recurso geotérmico de baja entalpia, ambos se consideran como agua pura para obtener las propiedades termodinámicas de los datos de tablas de vapor.
- Las cámaras están completamente aisladas térmicamente para evitar la 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.
- Las tuberías que conducen el agua de mar, la salmuera, el vapor y el recurso geotérmico están perfectamente aisladas térmicamente para evitar pérdidas de calor.

Con respecto a los parámetros de funcionamiento, los datos se presentan a continuación:

Presión inicial del agua de mar: 1.013 [bar]
 Temperatura inicial del agua de mar a: 25 [°C]
 Aumento de presión con las bombas: 1.5 [bar]
 Disminución de presión en los intercambiadores de calor: 1 [bar]
 Pinch de acercamiento en los precalentadores entre el agua de mar y salmuera: 3 [°C]
 Pinch de acercamiento en los precalentadores entre el agua de mar y el destilado: 3 [°C]
 Gasto de agua de mar (\dot{m}_{am}): 0.63 [kg/s]
 Gasto auxiliar de agua de mar (\dot{m}_A): 0.030 [kg/s]
 Gasto de recurso geotérmico (\dot{m}_G): 0.567 [kg/s]
 Temperatura del recurso geotérmico: 85 [°C]
 Salinidad del agua de mar: 35000 ppm
 Presión en el evaporador: 0.199 [bar]
 Presión después de la bomba de destilado: 2.5 [bar]
 Presión después de la bomba de salmuera: 1.5 [bar]

Finalmente se hace la simulación del proceso en una hoja de cálculo (Anexo 3) para obtener los resultados necesarios para realizar la comparación entre las tres tecnologías.

Después de hacer el análisis de cada uno de los sistemas de desalación estudiados, a continuación se presenta una tabla con los resultados que se consideran más importantes.

Tabla 4. 1 Comparación de resultados entre los sistemas de desalación con recurso geotérmico

| | MED-LE | MSF CON GEOTERMIA | MVC CON GEOTERMIA |
|---|--------|----------------------|----------------------|
| Agua de mar de alimentación [kg/s] | 0.63 | 0.63 | 0.63 |
| Destilado [m ³ /hr] | 0.254 | 0.142 | 1.039 |
| % de desalación | 11.21 | 6.27 | 45.82 |
| Factor de concentración | 1.13 | 1.07 | 1.85 |
| PR [kg/MJ] | 0.813 | 0.465 | - |
| Potencia eléctrica [kW] | 0.402 | 0.240 | 5.901 |
| Consumo eléctrico [kWh/m ³] | 1.582 | 1.69 | 5.678 |

Conclusiones del capítulo 4

El uso de recursos geotérmicos es una buena alternativa como fuente de energía térmica para los procesos de desalación analizados, ya que a pesar de ser de baja entalpia, tienen una temperatura suficiente para ser aprovechada.

Por las características específicas que presenta cada tecnología, se tuvieron que hacer algunas adecuaciones para implementar la energía geotérmica al proceso de desalación, con el fin de poder tener un sistema lo más funcional posible.

Con respecto a los resultados generados, la comparación parte de los parámetros del sistema MED-LE, ya que es uno de los proyectos del grupo de trabajo IIDEA y del cual se tiene mayor información.

Debido a que no se cuenta con una fuente de vapor para producir el vacío, como es el caso de las tecnologías de desalación que se encuentran en las termoeléctricas, se requiere de otro tipo de fluido para generar el vacío necesario en el proceso y esto conlleva a tener un mayor consumo de energía eléctrica.

De los tres análisis se tiene que el MVC produce una mayor cantidad de destilado que los otros dos, sin embargo, su consumo eléctrico es muy elevado en comparación con los otros dos, principalmente por el uso de un compresor, otro inconveniente que presenta es el vapor necesario para el arranque del proceso. Si esto último fuera el principal inconveniente, probablemente se podría solucionar utilizando el recurso geotérmico como fuente de calor dentro del evaporador para conseguir la cantidad necesaria de vapor para que funcione el compresor.

Para tener un mejor aprovechamiento de la energía geotérmica es necesario seleccionar adecuadamente los equipos a utilizar, ya sean intercambiadores de calor, bombas, eyectores, compresores, entre otros; esto se logra haciendo un análisis detallado de cada uno y tomando en cuenta las condiciones a las que estará expuesto.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1 Análisis de resultados

Dentro de los resultados obtenidos del análisis hecho a los sistemas de desalación, se tienen parámetros esenciales para conocer el comportamiento de dichas tecnologías, así mismo, permiten hacer una comparativa para finalmente determinar cuál sistema presenta mejores condiciones al utilizar la energía geotérmica de baja entalpia.

En la Figura 5.1 se grafica el porcentaje de desalación al variar la temperatura del recurso geotérmico, como se puede apreciar, el comportamiento de los tres sistemas es prácticamente lineal y se tiene una mayor cantidad de destilado por parte de la tecnología MVC, seguida muy por debajo por la MED-LE y finalmente el MSF.

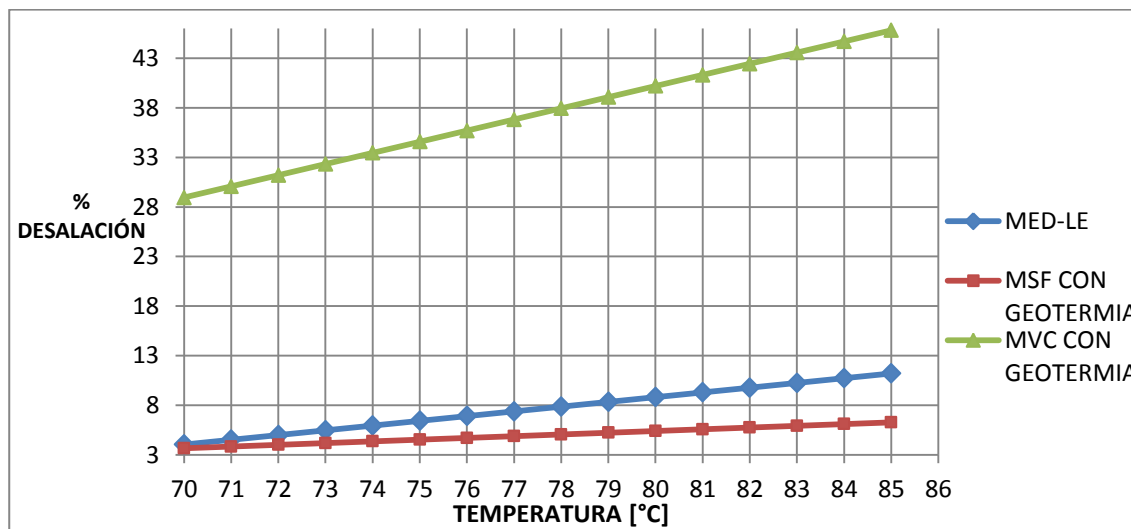


Figura 5.1 Porcentaje de desalación en función de la temperatura del recurso geotérmico

El Consumo Eléctrico es un indicativo esencial en el análisis de cada tecnología, en la Figura 5.2 se muestra que al aumentar la temperatura del recurso geotérmico, el CE tiende a disminuir de una forma considerable en los sistemas MED-LE y MSF, mientras que en el caso del MVC, no se tiene un decremento significativo.

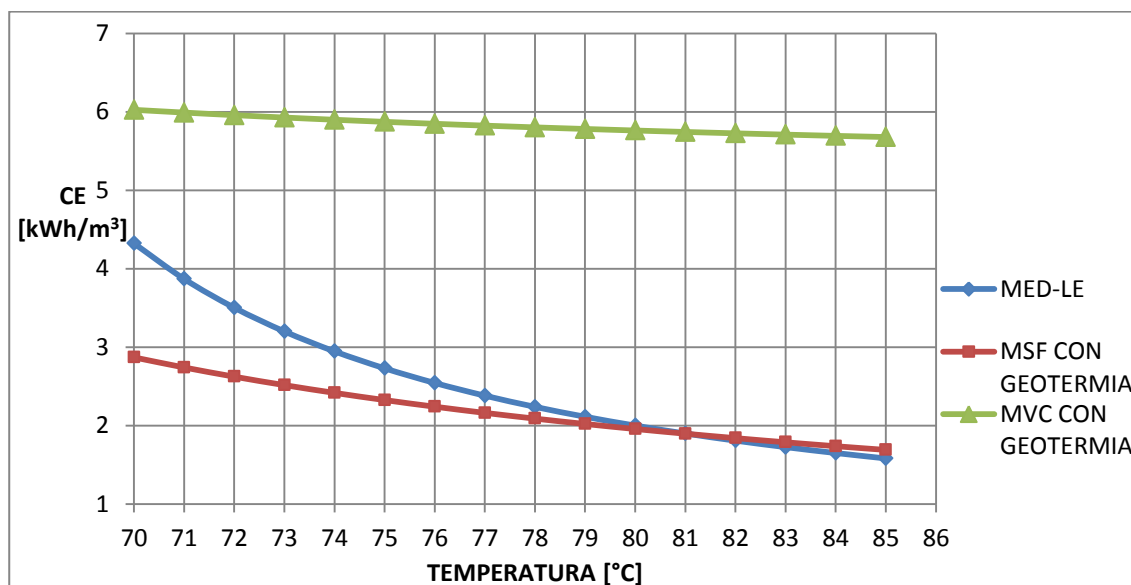


Figura 5.2 Consumo eléctrico (CE) en función de la temperatura del recurso geotérmico

En el gráfico siguiente se presenta el PR en función de la temperatura, únicamente para el sistema MED-LE y MSF con geotermia, debido a que el MVC analizado no requiere de manera significativa la energía térmica del recurso geotérmico para el proceso. Se aprecia un mejor desempeño del parámetro para el sistema MED-LE a medida que aumenta la temperatura de la fuente de calor, por otra parte, el otro sistema presenta una disminución linealmente paulatina.

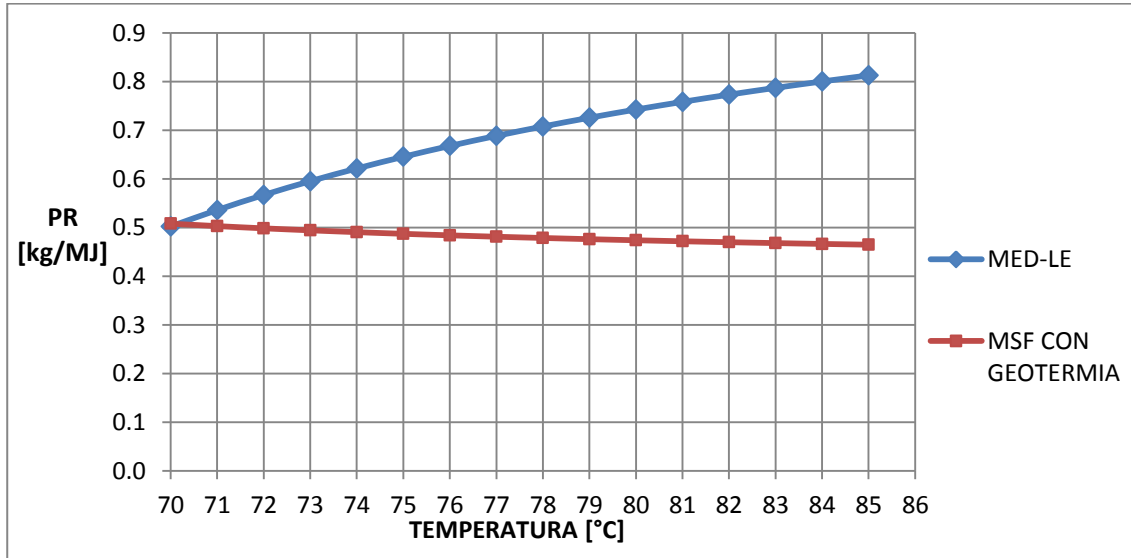


Figura 5. 3 Performance Ratio (PR) en función del recurso geotérmico

Para un buen funcionamiento de los sistemas de desalación, una de las prioridades es evitar las incrustaciones, para ello, es de suma importancia tener un Factor de Concentración bajo. La Figura 5.3 presenta el comportamiento del FC de los tres sistemas al variar la temperatura del agua geotérmica, para el MVC la concentración de sales excede los valores típicos que van de 1.3 a 1.5⁹, mientras que la MED-LE y MSF ostentan un excelente Factor de Concentración.

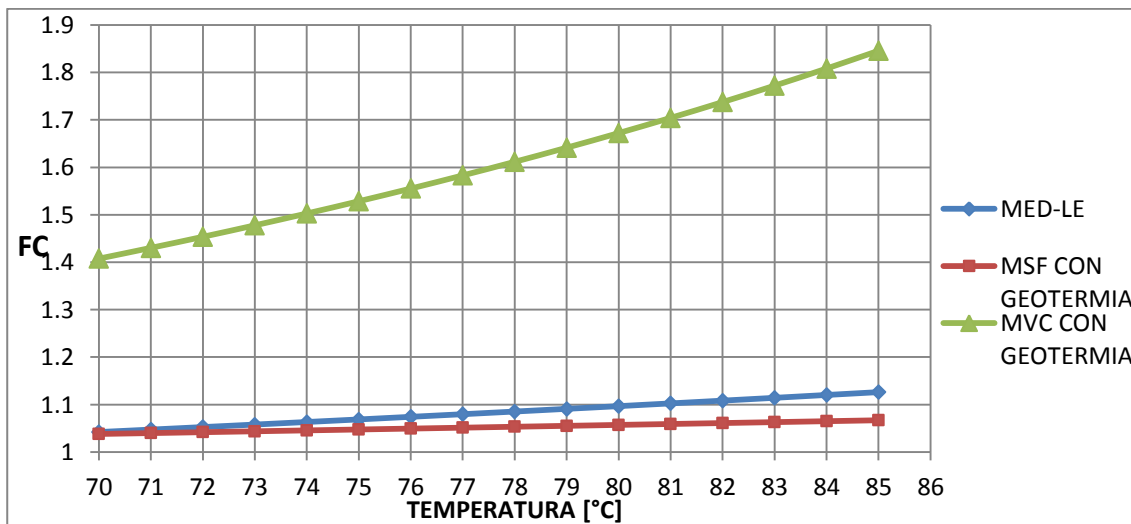


Figura 5. 4 Factor de concentración (FC) en función de la temperatura del recurso geotérmico

⁹ Glade H. *Fundamentals of Thermal Processes*. DME Workshop Thermal Desalination of Saline Waters. Essen, Alemania. Enero 2009.

5.2 Conclusiones Generales

Después de desarrollar el presente trabajo de tesis, las conclusiones generales obtenidas son las siguientes:

- México es un país rico en recursos naturales, esto aunado a la ubicación geográfica que presenta, hace que el territorio nacional tenga un gran potencial en energías alternas, como es el caso de la geotermia, ya que en nuestro territorio se tiene una gran cantidad de lugares con manifestaciones evidentes de este recurso. De cierta manera se ha desaprovechado el potencial que presenta este tipo de energía, ya que las aplicaciones más populares es con fines recreativos como la balneología, por lo cual, con un correcto enfoque en su uso, podría ser útil en procesos como desalación, secado de alimentos, calefacción, invernaderos, entre otros; y con ello traer grandes beneficios para las comunidades aledañas al lugar.
- De los tres sistemas analizados y tomando en cuenta las consideraciones hechas en cada caso, se tiene que el sistema que mayor cantidad de destilado obtiene es el de compresión mecánica de vapor (MVC) con un aproximado de 1.04 [m³/hr], seguido por el MED-LE con 0.25 [m³/hr] y el MSF con 0.14 [m³/hr]. Esto nos muestra que la compresión mecánica de vapor produce prácticamente cuatro veces más que el MED-LE.
- Un parámetro importante es el Consumo Eléctrico que muestra en su gráfica correspondiente como disminuye a medida que aumenta la temperatura del recurso geotérmico, siendo el más bajo el MED-LE con 1.58 [kWh/m³] en comparación con el MSF que presenta 1.69 [kWh/m³] y el 5.67 [kWh/m³] que se obtiene del MVC, estos resultados corresponden a las condiciones iniciales que se establecieron y que se pueden apreciar en el anexo correspondiente a cada sistema. La diferencia en el consumo eléctrico es muy significativo entre el MVC y los otros dos, lo cual se traduce en un excesivo consumo energético y por ende, económico.
- Los equipos empleados trabajan con agua de mar, es por ello que están expuestos a las incrustaciones y esto conlleva a un bajo rendimiento en la transferencia de calor, para evitar esto, es de suma importancia controlar el Factor de Concentración de la salmuera, en el caso del MED-LE se obtiene un FC de 1.12, el MSF presenta un valor de 1.07, los cuales son resultados aceptables, mientras que el MVC al destilar una gran cantidad de agua, ostenta una gran cantidad de sales, con un FC de 1.85 y que puede derivar en un gran problema de incrustaciones.
- Con base en los resultados obtenidos de los análisis realizados y teniendo como prioridad la obtención de la mayor cantidad de agua destilado pero con un bajo consumo de energía eléctrica, se determina que la opción más viable técnicamente en el sistema MED-LE, esto con sus debidas reservas, ya que para conocer con más precisión su desempeño y aprovechar de la mejor manera posible la energía geotérmica se requiere un estudio más detallado de los equipos a utilizar en el proceso, como son los intercambiadores de calor, equipos de vacío, bombas para mover los líquidos, así como otros elementos que se consideren necesarios.
- Las desaladoras que se encuentran en las centrales termoeléctricas producen el vacío necesario para su proceso por medio del vapor que dichas instalaciones producen, teniendo esto como antecedente, en los sistemas analizados no se cuenta con este fluido, es por ello que se hace la suposición de que el vacío necesario para cada caso se produce por medio de aire movido por un equipo eléctrico, el cual no se tomó en cuenta en el análisis eléctrico ya que la selección del equipo adecuado depende de un estudio más profundo tomando en cuenta los parámetros de funcionamiento del sistema.

- La desalación con energía geotérmica es una alternativa viable para obtener agua para el aprovechamiento en diversas actividades del ser humano, el proceso que se elija ya sea MED, MVC o MSF dependerá de las necesidades que se tengan, pero sobre todo de los recursos con que se cuenten. Así como en este trabajo se ocupó el recurso geotérmico para conocer la factibilidad técnica de desalar agua de mar, es posible que también sea viable realizar un proceso de desalación con algún otro tipo de energía alterna, esto dependerá del lugar donde se requiera, los recursos con que se cuente y de un correcto análisis para aprovechar de la mejor manera su potencial.

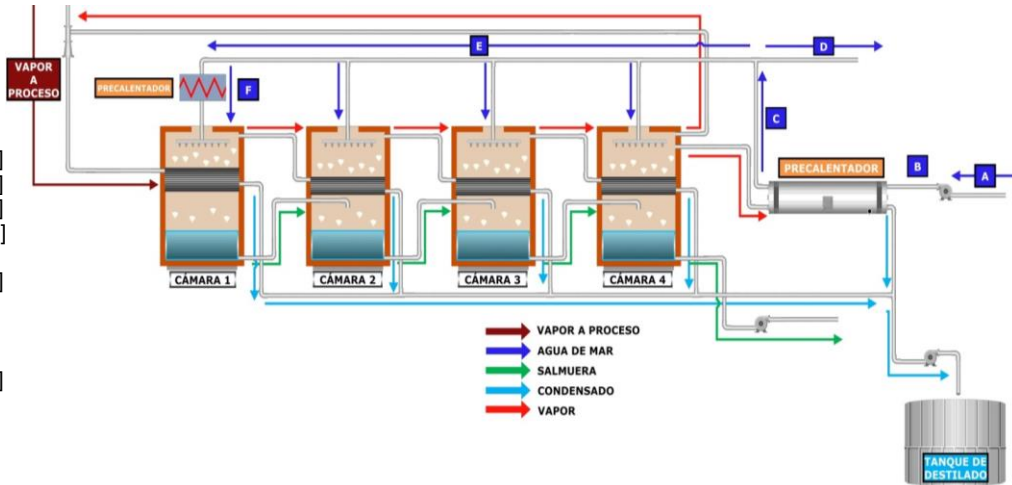
ANEXOS

Anexo 1. Simulación en hoja de cálculo del sistema MED convencional

DATOS:

- Presión del agua de mar a la entrada:
- Presión del agua de mar después de la bomba:
- Temperatura del agua de mar:
- Presión del agua de mar a la entrada de las cámaras:
- Gasto total de agua de mar (m_A):
- Gasto de agua de mar rechazado (m_D):
- Gasto de agua de mar al proceso (m_E):
- Salinidad del agua de mar:
- Número de cámaras:
- Gasto de vapor a proceso (m_p):
- Presión del vapor a proceso a la entrada de la primera cámara:
- Temperatura del vapor a proceso a la entrada de la primera cámara:
- Temperatura de condensado del vapor a proceso a la salida de la primera cámara:
- Gasto de vapor extraído de la última cámara por el eyector:
- Presión del destilado después de la bomba:
- Presión de la salmuera después de la bomba:

| | |
|---------|----------------|
| Fluido | Water |
| Sistema | C |
| | 1.01 [bar] |
| | 3 [bar] |
| | 35 [°C] |
| | 1.45 [bar] |
| | 208.333 [kg/s] |
| | 166.667 [kg/s] |
| | 41.667 [kg/s] |
| | 37300 [ppm] |
| | 4 |
| | 3.69444 [kg/s] |
| | 0.2 [bar] |
| | 101 [°C] |
| | 60.7 [°C] |
| | 1.722 [kg/s] |
| | 2.75 [bar] |
| | 1.03 [bar] |



| | VAPOR A PROCESO | | CÁMARA 1 | | | CÁMARA 2 | | | CÁMARA 3 | | | CÁMARA 4 | | |
|------------------------------|-----------------|------------|----------|------------|----------|----------|------------|----------|----------|------------|----------|----------|------------|----------|
| | VAPOR | CONDENSADO | VAPOR | CONDENSADO | SALMUERA | VAPOR | CONDENSADO | SALMUERA | VAPOR | CONDENSADO | SALMUERA | VAPOR | CONDENSADO | SALMUERA |
| PRESIÓN [bar] | 0.2 | | 0.169 | 0.169 | 0.169 | 0.139 | 0.139 | 0.139 | 0.113 | 0.113 | 0.113 | 0.091 | 0.091 | 0.091 |
| TEMPERATURA [°C] | 101 | 60.70 | 56.46 | 56.46 | 56.46 | 52.40 | 52.40 | 52.40 | 48.22 | 48.22 | 48.22 | 43.97 | 43.97 | 43.97 |
| GASTO [kg/s] | 3.69 | 3.69 | 3.69 | 3.69 | 6.73 | 3.49 | 3.49 | 13.66 | 3.42 | 3.42 | 20.65 | 3.49 | 1.77 | 27.58 |
| GASTO [Ton/hr] | 13.30 | 13.30 | 13.27 | 13.27 | 24.23 | 12.56 | 12.56 | 49.17 | 12.32 | 12.32 | 74.35 | 12.56 | 6.36 | 99.29 |
| ENTALPIA [kJ/kg] | 2688.14 | 254.11 | 2602.66 | 236.37 | 236.37 | 2595.52 | 219.38 | 219.38 | 2588.14 | 201.89 | 201.89 | 2580.60 | 184.14 | 184.14 |
| CONCENTRACIÓN DE SALES [ppm] | | | | | 57719 | | | 56892 | | | 56440 | | | 56349 |
| FACTOR DE CONCENTRACIÓN | | | | | 1.55 | | | 1.53 | | | 1.51 | | | 1.51 |

BOMBAS:

| | AGUA DE MAR | CONDENSADO | SALMUERA |
|----------------|-------------|------------|----------|
| EFICIENCIA [%] | 75% | 75% | 75% |
| POTENCIA [kW] | 55.278 | 5.693 | 3.453 |

| | |
|---------------------|-------|
| POTENCIA TOTAL [kW] | 64.42 |
|---------------------|-------|

| | [kg/s] | [m³/h] |
|---------------------------|--------|---------|
| GASTO TOTAL DE CONDENSADO | 16.058 | 57.808 |
| GASTO TOTAL DE SALMUERA | 27.581 | 99.292 |
| GASTO DE AGUA DE MAR | 41.667 | 150.000 |

| | |
|------------------------------|-------|
| PORCENTAJE DE DESALACIÓN [%] | 33.81 |
|------------------------------|-------|

CONSUMO ELÉCTRICO

| | |
|--------------|-------|
| CE [kW·h/m³] | 1.114 |
|--------------|-------|

RENDIMIENTO TÉRMICO:

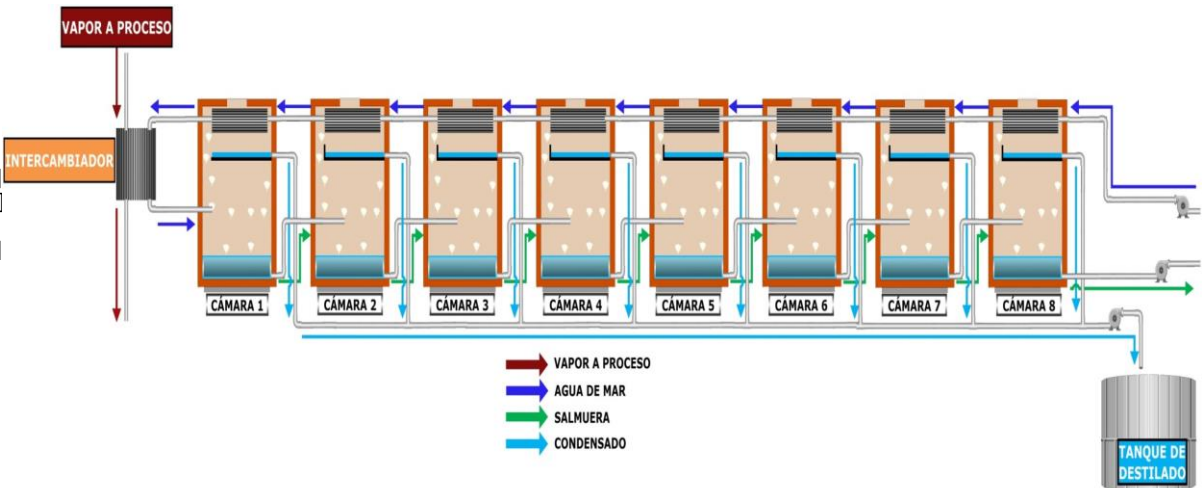
| | |
|-----|-------|
| GOR | 4.346 |
|-----|-------|

Anexo 2. Simulación en hoja de cálculo del sistema MSF convencional

DATOS:

| | |
|---------|---------------|
| Fluido | Water |
| Sistema | C |
| | 1 [bar] |
| | 31.5 [°C] |
| | 4.7 [bar] |
| | 2.82 [bar] |
| | 5 [°C] |
| | 205.56 [kg/s] |
| | 35000 [ppm] |
| | 8 |
| | 4.019 [kg/s] |
| | 2.89 [bar] |
| | 270 [°C] |
| | 2.4 [bar] |
| | 87 [°C] |
| | 0.64 [bar] |
| | 0.38 [bar] |
| | 0.07 [bar] |
| | 2 [bar] |
| | 1.35 [bar] |

Presión del agua de mar antes de la bomba:
 Temperatura del agua de mar a la entrada de la bomba
 Presión del agua de mar después de la bomba:
 Presión del agua de mar a la salida de los precalentadores:
 Pinch de acercamiento en precalentadores entre el agua de mar y las cámaras:
 Gasto de agua de mar (m_{am}):
 Salinidad del agua de mar
 Número de cámaras
 Gasto del vapor a proceso(m_v):
 Presión del vapor a proceso a la entrada del intercambiador:
 Temperatura del vapor a proceso a la entrada del intercambiador:
 Presión del condensado a proceso a la salida del intercambiador:
 Temperatura del condensado a proceso a la salida del intercambiador:
 Presión del agua de mar a la salida del intercambiador:
 Presión en la cámara 1:
 Presión en la última cámara:
 Presión después de la bomba de destilado:
 Presión después de la bomba de salmuera:



| | VAPOR A PROCESO | | CÁMARA 1 | | CÁMARA 2 | | CÁMARA 3 | | CÁMARA 4 | | CÁMARA 5 | | CÁMARA 6 | | CÁMARA 7 | | CÁMARA 8 | |
|------------------------------|-----------------|------------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| | VAPOR | CONDENSADO | CONDENSADO | SALMUERA | CONDENSADO | SALMUERA | CONDENSADO | SALMUERA | CONDENSADO | SALMUERA | CONDENSADO | SALMUERA | CONDENSADO | SALMUERA | CONDENSADO | SALMUERA | CONDENSADO | SALMUERA |
| PRESIÓN [bar] | 2.89 | 2.40 | 0.38 | 0.38 | 0.34 | 0.34 | 0.29 | 0.29 | 0.25 | 0.25 | 0.20 | 0.20 | 0.16 | 0.16 | 0.11 | 0.11 | 0.07 | 0.07 |
| TEMPERATURA [°C] | 270 | 87.04 | 74.63 | 74.63 | 71.70 | 71.70 | 68.43 | 68.43 | 64.71 | 64.71 | 60.36 | 60.36 | 55.13 | 55.13 | 48.44 | 48.44 | 39.00 | 39.00 |
| GASTO [kg/s] | 4.02 | 4.02 | 2.76 | 202.80 | 1.07 | 201.73 | 1.18 | 200.55 | 1.33 | 199.21 | 1.54 | 197.68 | 1.83 | 195.85 | 2.29 | 193.55 | 3.17 | 190.38 |
| GASTO [Ton/hr] | 14.47 | 14.47 | 9.92 | 730.08 | 3.85 | 726.23 | 4.26 | 721.97 | 4.80 | 717.17 | 5.53 | 711.64 | 6.59 | 705.05 | 8.26 | 696.79 | 11.42 | 685.37 |
| ENTALPIA DE VAPOR [kJ/kg] | 3008.84 | | 2633.97 | | 2629.00 | | 2623.41 | | 2617.00 | | 2609.47 | | 2600.31 | | 2588.53 | | 2571.72 | |
| ENTALPIA DE LÍQUIDO [kJ/kg] | | 364.73 | 312.47 | 312.47 | 300.20 | 300.20 | 286.49 | 286.49 | 270.89 | 270.89 | 252.71 | 252.71 | 230.78 | 230.78 | 202.83 | 202.83 | 163.35 | 163.35 |
| CONCENTRACIÓN DE SALES [ppm] | | | | 35476 | | 35663 | | 35874 | | 36114 | | 36395 | | 36735 | | 37170 | | 37790 |
| FACTOR DE CONCENTRACIÓN | | | | 1.01 | | 1.02 | | 1.02 | | 1.03 | | 1.04 | | 1.05 | | 1.06 | | 1.08 |

BOMBAS:

| | AGUA DE MAR | CONDENSADO | SALMUERA |
|----------------|-------------|------------|----------|
| EFICIENCIA [%] | 60% | 60% | 60% |
| POTENCIA [kW] | 126.759 | 4.881 | 40.615 |

POTENCIA TOTAL [kW] 172.26

CONSUMO ELÉCTRICO

CE [kW*h/m³] 3.153

| | [kg/s] | [m ³ /h] |
|----------------------------|---------|---------------------|
| GASTO TOTAL DE CONDENSADO | 15.175 | 54.630 |
| GASTO TOTAL DE SALMUERA | 190.381 | 685.370 |
| GASTO TOTAL DE AGUA DE MAR | 205.556 | 740.000 |

PORCENTAJE DE DESALACIÓN [%] 7.38

RENDIMIENTO TÉRMICO:

GOR 3.775

Anexo 3. Simulación en hoja de cálculo del sistema MVC convencional

DATOS:



| | |
|---------|--------------|
| Fluido | Water |
| Sistema | C |
| | 1.013 [bar] |
| | 25 [°C] |
| | 1.54 [bar] |
| | 1 [bar] |
| | 5 [°C] |
| | 5 [°C] |
| | 19.11 [kg/s] |
| | 35000 [ppm] |
| | 50.64 [kg/s] |
| | 0.199 [bar] |
| | 10 [°C] |

Presión del agua de mar antes de la bomba:

Temperatura del agua de mar a la entrada de la bomba

ΔP en las bombas:

ΔP en los precalentadores:

Pinch de acercamiento en el precalentador entre el agua de mar y la salmuera:

Pinch de acercamiento en el precalentador entre el agua de mar y el destilado:

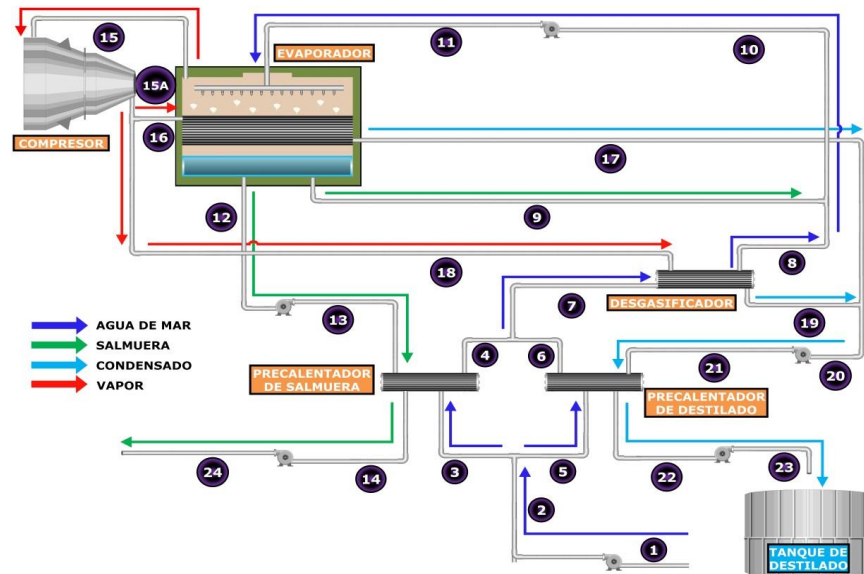
Gasto de agua de mar (m_{am}):

Salinidad del agua de mar

Gasto de salmuera de recirculación:

Presión en el evaporador:

pinch de acercamiento en el desgasificador entre el agua de mar y el destilado:



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 15A | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PRESIÓN [bar] | 1.013 | 2.553 | 2.553 | 1.553 | 2.553 | 1.553 | 1.553 | 0.553 | 0.199 | 0.553 | 2.093 | 0.199 | 1.739 | 0.739 | 0.199 | 0.259 | 0.259 | 0.259 | 0.259 | 0.259 | 0.259 | 1.799 | 0.799 | 2.339 | 2.279 |
| TEMPERATURA [°C] | 25 | 25 | 25 | 54.95 | 25 | 76.77 | 65.86 | 71.77 | 59.95 | 63.19 | 63.19 | 59.95 | 59.95 | 29.61 | 59.95 | 81.77 | 81.77 | 81.77 | 81.77 | 81.77 | 81.77 | 81.77 | 30.80 | 30.80 | 29.61 |
| GASTO [kg/s] | 19.111 | 19.111 | 9.556 | 9.556 | 9.556 | 9.556 | 19.111 | 19.111 | 50.639 | 69.750 | 69.750 | 9.421 | 9.421 | 9.421 | 9.690 | 9.690 | 9.485 | 9.485 | 0.204 | 0.204 | 9.690 | 9.690 | 9.690 | 9.690 | 9.421 |
| GASTO [Ton/hr] | 68.8 | 68.8 | 34.4 | 34.4 | 34.4 | 34.4 | 68.8 | 68.8 | 182.30 | 251.10 | 251.10 | 33.92 | 33.92 | 33.92 | 34.88 | 34.88 | 34.15 | 34.15 | 0.74 | 0.74 | 34.88 | 34.88 | 34.88 | 34.88 | 33.92 |
| ENTALPIA [kJ/kg] | 104.9 | 105.1 | 105.1 | 230.2 | 105.1 | 321.6 | 275.8 | 300.5 | 251.0 | 264.6 | 264.7 | 251.0 | 251.1 | 124.1 | 2608.7 | 2650.2 | 2650.2 | 342.5 | 2650.2 | 342.5 | 342.5 | 342.6 | 129.1 | 129.3 | 124.3 |
| CONCENTRACIÓN DE SALES [ppm] | 35000 | 35000 | 35000 | 35000 | 35000 | 35000 | 35000 | 35000 | 70998 | 61135 | 61135 | 70998 | 70998 | 70998 | | | | | | | | | | | |
| ENTROPIA [kJ/kg k] | | | | | | | | | | | | | | | 7.909 | 7.909 | | | | | | | | | |
| VOLUMEN ESPECÍFICO [m³/kg] | | | | | | | | | | | | | | | 7.684 | | | | | | | | | | |

BOMBAS:

| | Agua de mar 1 | Condensado 21 | Salmuera 13 | Agua de mar 10 | Condensado 23 | Salmuera 24 |
|----------------|---------------|---------------|-------------|----------------|---------------|-------------|
| EFICIENCIA [%] | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% |
| POTENCIA [kW] | 3.679 | 1.865 | 1.814 | 13.427 | 1.865 | 1.814 |

COMPRESOR:

| | |
|------------------|-----|
| γ | 1.3 |
| η_{mec} | 80% |
| \dot{w}_c [kW] | 501 |

| | [kg/s] | [m³/h] |
|----------------------------|--------|--------|
| GASTO TOTAL DE CONDENSADO | 9.690 | 34.884 |
| GASTO TOTAL DE SALMUERA | 9.421 | 33.916 |
| GASTO TOTAL DE AGUA DE MAR | 19.111 | 68.800 |

POTENCIA TOTAL [kW] **525.41**

CONSUMO ELÉCTRICO

CE [kW·h/m³] **15.062**

PORCENTAJE DE DESALACIÓN [%] **50.70**

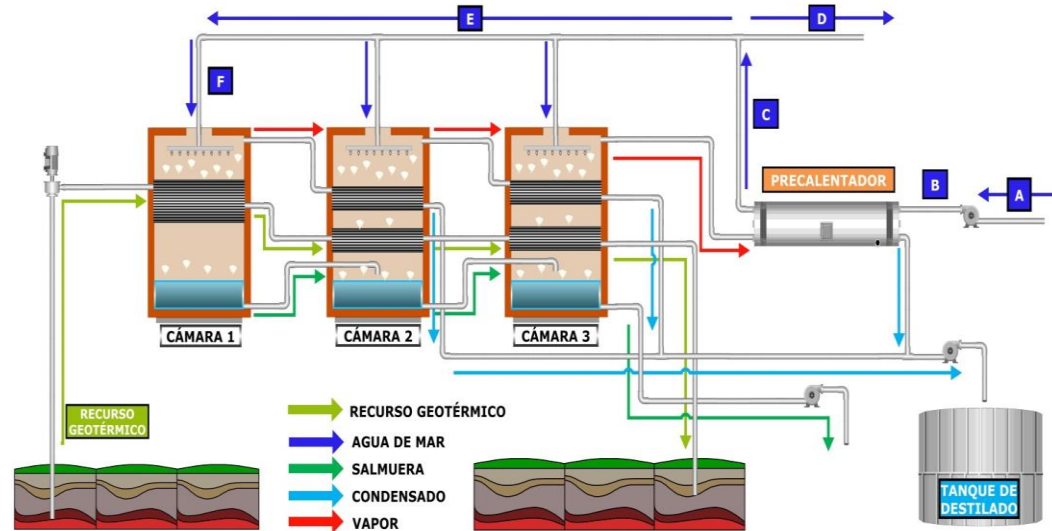
FACTOR DE CONCENTRACIÓN **2.03**

Anexo 4. Simulación en hoja de cálculo del sistema MED con geotermia (MED-LE)

DATOS:

Presión del agua de mar a la entrada: 1.013 [bar]
 Presión del agua de mar después de la bomba: 2.413 [bar]
 Temperatura del agua de mar: 25 [°C]
 Presión del agua de mar a la entrada de las cámaras: 2.063 [bar]
 Pinch de acercamiento en el condensador: 8 [°C]
 Gasto total de agua de mar (m_A): 1.0670 [kg/s]
 Gasto de agua de mar rechazado (m_B): 0.437 [kg/s]
 Gasto de agua de mar al proceso (m_E): 0.630 [kg/s]
 Salinidad del agua de mar: 35000 [ppm]
 Número de cámaras: 3 [kg/s]
 Gasto de recurso geotérmico (m_G): 0.576 [kg/s]
 Presión del recurso geotérmico a la entrada de la primera cámara: 2 [bar]
 Temperatura del recurso geotérmico a la entrada de la primera cámara: 85 [°C]
 Pinch de acercamiento en la cámara entre recurso geotérmico y el agua de mar: 3 [°C]
 Caída de presión del recurso geotérmico en las cámaras: 0.35 [bar]
 Presión en la cámara 1: 0.156 [bar]
 Presión en la cámara 2: 0.129 [bar]
 Presión en la cámara 3: 0.101 [bar]
 Presión del destilado después de la bomba: 2.5 [bar]
 Presión de la salmuera después de la bomba: 1.5 [bar]

| | | |
|---------|--------|--------|
| Fluido | Water | |
| Sistema | C | |
| | 1.013 | [bar] |
| | 2.413 | [bar] |
| | 25 | [°C] |
| | 2.063 | [bar] |
| | 8 | [°C] |
| | 1.0670 | [kg/s] |
| | 0.437 | [kg/s] |
| | 0.630 | [kg/s] |
| | 35000 | [ppm] |
| | 3 | [kg/s] |
| | 0.576 | [kg/s] |
| | 2 | [bar] |
| | 85 | [°C] |
| | 3 | [°C] |
| | 0.35 | [bar] |
| | 0.156 | [bar] |
| | 0.129 | [bar] |
| | 0.101 | [bar] |
| | 2.5 | [bar] |
| | 1.5 | [bar] |



| | RECURSO GEOTÉRMICO | | | | CÁMARA 1 | | | CÁMARA 2 | | | CÁMARA 3 | | |
|------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|-----------|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|------------|----------|
| | G1 | G2 | G3 | G4 | DESTILADO | | SALMUERA | DESTILADO | | SALMUERA | DESTILADO | | SALMUERA |
| | | | | | VAPOR | CONDENSADO | | VAPOR | CONDENSADO | | VAPOR | CONDENSADO | |
| PRESIÓN [bar] | 2 | 1.65 | 1.3 | 0.95 | 0.156 | 0.156 | 0.156 | 0.129 | 0.129 | 0.129 | 0.101 | 0.101 | 0.101 |
| TEMPERATURA [°C] | 85 | 57.78 | 53.80 | 49.00 | 54.78 | 54.78 | 54.78 | 50.80 | 50.80 | 50.80 | 46.00 | 46.00 | 46.00 |
| GASTO [kg/s] | 0.58 | 0.58 | 0.58 | 0.58 | 0.022 | 0.022 | 0.188 | 0.022 | 0.022 | 0.376 | 0.027 | 0.027 | 0.559 |
| GASTO [Ton/hr] | 2.07 | 2.07 | 2.07 | 2.07 | 0.077 | 0.077 | 0.679 | 0.079 | 0.079 | 1.355 | 0.097 | 0.097 | 2.014 |
| ENTALPIA [kJ/kg] | 356.13 | 242.03 | 225.33 | 205.24 | 2599.72 | 229.35 | 229.35 | 2592.70 | 212.68 | 212.68 | 2584.20 | 192.62 | 192.62 |
| CONCENTRACIÓN DE SALES [ppm] | | | | | | | 38993 | | | 39051 | | | 39418 |
| FACTOR DE CONCENTRACIÓN | | | | | | | 1.11 | | | 1.12 | | | 1.13 |

BOMBAS:

| | AGUA DE MAR | CONDENSADO | SALMUERA | GEOTERMIA |
|----------------|-------------|------------|----------|-----------|
| EFICIENCIA [%] | 75% | 75% | 75% | 75% |
| POTENCIA [kW] | 0.199 | 0.023 | 0.104 | 0.076 |

POTENCIA TOTAL [kW] **0.402**

| | [kg/s] | [m ³ /h] |
|----------------------------|--------|---------------------|
| GASTO TOTAL DE CONDENSADO | 0.071 | 0.254 |
| GASTO TOTAL DE SALMUERA | 0.559 | 2.014 |
| GASTO TOTAL DE AGUA DE MAR | 0.630 | 2.268 |

PORCENTAJE DE DESALACIÓN [%] **11.21**

CONSUMO ELÉCTRICO:

CE [kW*h/m³] **1.581**

RENDIMIENTO TÉRMICO:

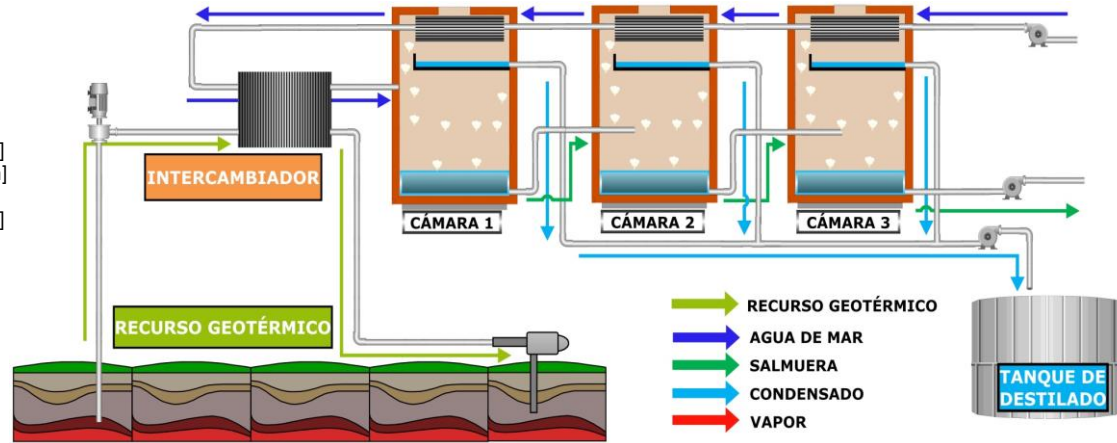
PR [kg/MJ] **0.813**

Anexo 5. Simulación en hoja de cálculo del sistema MSF con geotermia

DATOS:

Presión del agua de mar antes de la bomba:
 Temperatura del agua de mar a la entrada de la bomba:
 Presión del agua de mar después de la bomba:
 Presión del agua de mar precalentada a la salida de la primera cámara:
 Pinch de acercamiento en los precalentadores entre el agua de mar y las cámaras:
 Gasto de agua de mar (m_{am}):
 Salinidad del agua de mar:
 Número de cámaras:
 Gasto del recurso geotérmico (m_g):
 Presión del recurso geotérmico a la entrada del intercambiador:
 Temperatura del recurso geotérmico a la entrada del intercambiador:
 Caída de presión del recurso geotérmico en el intercambiador:
 Pinch de acercamiento en el intercambiador entre el recurso geotérmico y agua de mar:
 Presión en la cámara 1:
 Presión en la última cámara:
 Presión después de la bomba de destilado:
 Presión después de la bomba de salmuera:
 Caída de presión del agua de mar por cada precalentador:
 Caída de presión del agua de mar en el intercambiador:

| | |
|---------|--------------|
| Fluido | Water |
| Sistema | C |
| | 1.013 [bar] |
| | 25 [°C] |
| | 2.413 [bar] |
| | 1.363 [bar] |
| | 5 [°C] |
| | 0.630 [kg/s] |
| | 35000 [ppm] |
| | 3 |
| | 0.576 [kg/s] |
| | 2 [bar] |
| | 85 [°C] |
| | 1 [bar] |
| | 3 [°C] |
| | 0.156 [bar] |
| | 0.101 [bar] |
| | 2.5 [bar] |
| | 1.5 [bar] |
| | 0.35 [bar] |
| | 1.5 [bar] |



| | RECURSO GEOTÉRMICO | | CÁMARA 1 | | CÁMARA 2 | | CÁMARA 3 | |
|------------------------------|--------------------|--------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| | G-1 | G-2 | CONDENSADO | SALMUERA | CONDENSADO | SALMUERA | CONDENSADO | SALMUERA |
| PRESIÓN [bar] | 2.0 | 1.0 | 0.156 | 0.156 | 0.129 | 0.129 | 0.101 | 0.101 |
| TEMPERATURA [°C] | 85 | 49.80 | 54.78 | 54.78 | 50.80 | 50.80 | 46.00 | 46.00 |
| GASTO [kg/s] | 0.576 | 0.576 | 0.030 | 0.600 | 0.004 | 0.595 | 0.005 | 0.590 |
| GASTO [Ton/hr] | 2.07 | 2.07 | 0.109 | 2.159 | 0.015 | 2.144 | 0.018 | 2.126 |
| ENTALPIA DE VAPOR [kJ/kg] | | | 2599.72 | | 2592.70 | | 2584.20 | |
| ENTALPIA DE LÍQUIDO [kJ/kg] | 356.13 | 208.46 | 229.35 | 229.35 | 212.68 | 212.68 | 192.62 | 192.62 |
| CONCENTRACIÓN DE SALES [ppm] | | | | 36770 | | 37029 | | 37343 |
| FACTOR DE CONCENTRACIÓN | | | | 1.05 | | 1.06 | | 1.07 |

BOMBAS:

| | AGUA DE MAR | CONDENSADO | SALMUERA | GEOTERMIA |
|----------------|-------------|------------|----------|-----------|
| EFICIENCIA [%] | 75% | 75% | 75% | 75% |
| POTENCIA [kW] | 0.118 | 0.013 | 0.110 | 0.076 |

| | |
|---------------------|-------|
| POTENCIA TOTAL [kW] | 0.240 |
|---------------------|-------|

| | [kg/s] | [m³/h] |
|----------------------------|--------|--------|
| GASTO TOTAL DE CONDENSADO | 0.040 | 0.142 |
| GASTO TOTAL DE SALMUERA | 0.590 | 2.126 |
| GASTO TOTAL DE AGUA DE MAR | 0.630 | 2.268 |

| | |
|------------------------------|------|
| PORCENTAJE DE DESALACIÓN [%] | 6.27 |
|------------------------------|------|

CONSUMO ELÉCTRICO

| | |
|--------------|-------|
| CE [kW·h/m³] | 1.690 |
|--------------|-------|

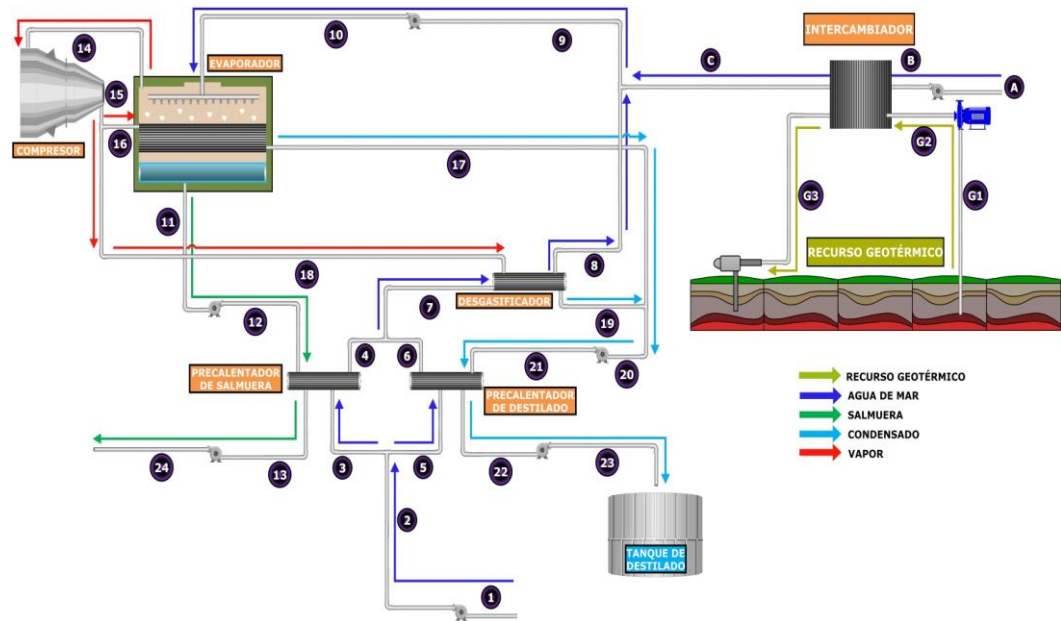
RENDIMIENTO TÉRMICO:

| | |
|------------|-------|
| PR [kg/MJ] | 0.465 |
|------------|-------|

Anexo 6. Simulación en hoja de cálculo del sistema MVC con geotermia

DATOS:

| | |
|--|--------------|
| Fluido | Water |
| Sistema | C |
| Presión del agua de mar antes de la bomba: | 1.013 [bar] |
| Temperatura del agua de mar a la entrada: | 25 [°C] |
| ΔP en las bombas: | 1.5 [bar] |
| ΔP en los precalentadores y en el intercambiador: | 1 [bar] |
| Pinch de acercamiento en el precalentador entre el agua de mar y la salmuera: | 3 [°C] |
| Pinch de acercamiento en el precalentador entre el agua de mar y el destilado: | 3 [°C] |
| Gasto de agua de mar total (m ₋): | 0.63 [kg/s] |
| Gasto de agua de mar calentado por el recurso geotérmico (m _A): | 0.030 [kg/s] |
| Salinidad del agua de mar: | 35000 [ppm] |
| Pinch de acercamiento en el intercambiador entre el recurso geotérmico y el agua de mar: | 3 [°C] |
| Gasto de recurso geotérmico (m _G): | 0.576 [kg/s] |
| Presión del recurso geotérmico a la entrada del intercambiador: | 2 [bar] |
| Temperatura del recurso geotérmico: | 85 [°C] |
| Presión en el evaporador: | 0.199 [bar] |
| pinch de acercamiento en el desgasificador entre el agua de mar y el destilado: | 3 [°C] |
| Presión después de la bomba de destilado: | 2.5 [bar] |
| Presión después de la bomba de salmuera: | 1.5 [bar] |



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | G1 | G2 | G3 | A | B | C |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PRESIÓN [bar] | 1.01 | 2.51 | 2.51 | 1.51 | 2.51 | 1.51 | 1.51 | 0.51 | 0.51 | 2.01 | 0.199 | 1.699 | 0.699 | 0.199 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 1.72 | 0.72 | 2.22 | 2.199 | 1.013 | 2.513 | 1.513 | 1.013 | 2.513 | 1.513 |
| TEMPERATURA [°C] | 25.00 | 25.00 | 25.00 | 56.95 | 25.00 | 64.71 | 60.83 | 64.71 | 65.53 | 65.53 | 59.95 | 59.95 | 31.90 | 59.95 | 67.71 | 67.71 | 67.71 | 67.71 | 67.71 | 67.71 | 67.71 | 26.48 | 26.48 | 31.90 | 85 | 85 | 82.10 | 25 | 25 | 82 |
| GASTO [kg/s] | 0.600 | 0.600 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.600 | 0.600 | 0.630 | 0.630 | 0.341 | 0.341 | 0.341 | 0.289 | 0.289 | 0.285 | 0.285 | 0.004 | 0.004 | 0.289 | 0.289 | 0.289 | 0.289 | 0.341 | 0.576 | 0.576 | 0.576 | 0.030 | 0.030 | 0.030 |
| GASTO [Ton/hr] | 2.160 | 2.160 | 1.080 | 1.080 | 1.080 | 1.080 | 2.160 | 2.160 | 2.268 | 2.268 | 1.229 | 1.229 | 1.229 | 1.039 | 1.039 | 1.024 | 1.024 | 0.015 | 0.015 | 1.039 | 1.039 | 1.039 | 1.039 | 1.229 | 2.072 | 2.072 | 2.072 | 0.108 | 0.108 | 0.108 |
| ENTALPIA [kJ/kg] | 104.9 | 105.1 | 105.1 | 238.5 | 105.1 | 271.0 | 254.8 | 270.9 | 274.4 | 274.5 | 251.0 | 251.1 | 133.7 | 2608.7 | 2623.5 | 2623.5 | 283.5 | 2623.5 | 283.5 | 283.5 | 283.5 | 111.0 | 111.2 | 133.7 | 356.0 | 356.2 | 343.7 | 104.9 | 105.1 | 343.5 |
| CONCENTRACIÓN DE SALES [ppm] | 35000 | 35000 | 35000 | 35000 | 35000 | 35000 | 35000 | 35000 | 35000 | 35000 | 64598 | 64598 | 64598 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ENTROPIA [kJ/kg k] | | | | | | | | | | | | | | 7.909 | 7.909 | | | | | | | | | | | | | | | |
| VOLUMEN ESPECÍFICO [m³/kg] | | | | | | | | | | | | | | 7.68 | | | | | | | | | | | | | | | | |

BOMBAS:

| | Agua de mar 1 | Condensado 21 | Salmuera 12 | Agua de mar 10 | Condensado 23 | Salmuera 24 | Agua de mar B | Geotermia |
|----------------|---------------|---------------|-------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-----------|
| EFICIENCIA [%] | 75% | 75% | 75% | 75% | 75% | 75% | 75% | 75% |
| POTENCIA [kW] | 0.120 | 0.058 | 0.068 | 0.126 | 0.058 | 0.068 | 0.006 | 0.115 |

CONSUMO ELÉCTRICO:

| | |
|---------------------|-------|
| POTENCIA TOTAL [kW] | 5.90 |
| CE [kW·h/m³] | 5.678 |

COMPRESOR:

| | |
|---------------------|-----|
| γ | 1.1 |
| η _{mec} | 80% |
| W _c [kW] | 5 |

| | [kg/s] | [m³/h] |
|---------------------------|--------|--------|
| GASTO TOTAL DE CONDENSADO | 0.289 | 1.039 |
| GASTO TOTAL DE SALMUERA | 0.341 | 1.229 |
| GASTO DE AGUA DE MAR | 0.630 | 2.268 |

| | |
|------------------------------|-------|
| PORCENTAJE DE DESALACIÓN [%] | 45.82 |
| FACTOR DE CONCENTRACIÓN | 1.85 |

GLOSARIO

Acuicultura: técnica del cultivo de especies acuáticas vegetales y animales.

Agua dulce: nombre que se le da al agua con una salinidad inferior a 500 ppm.

Bomba de calor: dispositivo que transfiere calor desde un medio de baja temperatura a otro de alta.

Capacidad neta: capacidad bruta de una unidad, central generadora o sistema eléctrico, a la cual se le ha desconectado la capacidad que se requiere para los usos propios de las centrales generadoras.

Corrosión: término que suele aplicarse al deterioro de los metales por un proceso electroquímico.

Demister: elemento que ayuda a quitar las pequeñas gotas de salmuera del vapor.

Desalación: proceso que separa las sales y minerales que se encuentran en un flujo de agua y se obtienen dos corrientes, una es el producto con baja salinidad y la otra es la salmuera con alta concentración de sales.

Destilado: producto con muy baja salinidad que se obtiene de la evaporación de agua de mar.

Electrodo: extremo de un conductor en contacto con un medio, al que lleva o del que recibe una corriente eléctrica.

Entalpia: término utilizado en ingeniería para denominar a la cantidad de calor útil que contiene un fluido, es decir, la energía interna del fluido más el trabajo asociado a su expansión al momento de aprovecharlo.

Eyector: dispositivo que opera con fluidos compresibles (gases y vapor o mezclas) para inducir un fluido secundario a partir de un flujo primario a alta velocidad, con base en la transferencia de momento y energía.

Factor de concentración: relación de salinidad entre el concentrado y el agua para proceso.

Flasheo: evaporación súbita por parte de la fase líquida del fluido para formar vapor, que ocurre con la disminución de la presión del fluido en el interior del pozo o a la salida de éste.

Geotermia: estudio y utilización de la energía térmica que, transportada a través de la roca y/o de fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma.

Gradiente geotérmico: proporción en la cual se incrementa la temperatura de la Tierra con la profundidad, reflejando el flujo de calor del interior de la misma hacia su superficie.

Incrustación: acumulación no deseada de depósitos, esencialmente microbiológicos, sobre una superficie artificial sumergida o en contacto con agua de mar.

Intercambiador de calor: dispositivo que permite la transferencia de energía térmica entre dos o más fluidos a diferente temperatura y en contacto térmico.

Litosfera: capa sólida más externa de la Tierra compuesta por diversos fragmentos en movimiento denominados placas tectónicas. Tiene un espesor medio de 50 km (mayor bajo los continentes y menor bajo los océanos) y está constituida por la corteza terrestre y la porción superior del manto.

Presión vacuométrica: es la diferencia entre la presión atmosférica y la presión absoluta.

Recuperación: porcentaje de producto que se obtiene a partir de un determinado volumen de agua de alimentación.

Reservorios: formados básicamente por grandes volúmenes de roca que se encuentran a muy altas temperaturas con alta permeabilidad y alta porosidad, en cuyas cavidades o poros se encuentra atrapada una importante cantidad de agua.

Salinidad: se define de acuerdo a los sólidos totales disueltos (TDS) y se mide en miligramos por litro (mg/l) o partes por millón (ppm).

Salmuera: solución salina muy concentrada.

Semipermeable: superficie de separación entre dos fases líquidas o gaseosas que deja pasar moléculas de algunos de los componentes de una fase, pero no del otro.

Supercrítico: condición de temperatura y presión por encima del punto crítico, donde no se distingue la fase líquida de la de vapor.

Temperatura de saturación: temperatura a la que una sustancia pura cambia de fase a una determinada presión.

Turbina: Equipo que convierte la energía total de un fluido (aire, agua, gas caliente o vapor) en energía mecánica de rotación utilizada de manera directa para mover un generador eléctrico acoplado.

Unidad a condensación: equipo de generación eléctrica que descarga el vapor de la turbina a un intercambiador de calor (llamado condensador), donde mediante enfriamiento artificial se condensa el vapor y se extrae como líquido, haciendo un vacío que mejora la eficiencia del ciclo.

Unidad a contrapresión: equipo de generación eléctrica que descarga el vapor de la turbina directamente a la atmósfera a través de un silenciador.

Vacío: término que se le da a una presión inferior a la atmosférica.

NOMENCLATURA

| | |
|-------------|---|
| \dot{Q} : | Tasa de transferencia de calor |
| c_p : | Calor específico del agua a presión constante |
| h : | Entalpia específica |
| \dot{m} : | Flujo másico |
| MW: | Mega Watt |
| MWe: | Mega Watt eléctrico |
| MWt: | Mega Watt térmico |
| ppm: | Partes por millón |
| t/h: | Tonelada por hora |
| \dot{W} : | Potencia eléctrica |
| P : | Presión |
| Q : | Calor |
| T : | Temperatura |
| W : | Trabajo |
| X : | Concentración de sales |
| v : | Volumen específico |
| x : | Calidad |

SUBÍNDICES

| | |
|---------|--|
| A : | Flujo de agua de mar inicial |
| B : | Flujo de agua de mar después de la bomba |
| C : | Flujo de agua de mar después del precalentador |
| D : | Flujo de agua de mar rechazada |
| E : | Flujo de agua de mar a las cámaras |
| F : | Flujo de agua de mar a cada cámara |
| G : | Recurso geotérmico |
| T : | Total |
| Td : | Total de destilado |
| a : | Aire |
| am : | Agua de mar |
| b : | Bomba |
| c : | Compresor |
| d : | Destilado |
| f : | Líquido saturado |
| g : | Vapor saturado |
| i : | i-ésimo componente |
| in : | Entrada |
| mec : | Mecánica |
| out : | Salida |
| $p1$: | Vapor a proceso a la entrada |
| $p2$: | Vapor a proceso a la salida |
| s : | Salmuera |
| sum : | Suministrado |
| v : | Vapor de agua |
| ve : | Vapor al eyector |
| vp : | Vapor al precalentador |

LETRAS GRIEGAS

| | |
|------------|--|
| η : | Eficiencia |
| γ : | Factor de compresibilidad isoentrópico |

ACRÓNIMOS

| | |
|-------------|--|
| CE: | Consumo Eléctrico |
| CF: | Concentration Factor |
| CFE: | Comisión Federal de Electricidad |
| ED: | Electrodialysis |
| GOR: | Gain Output Ratio |
| II: | Instituto de Ingeniería |
| IMPULSA IV: | Investigación Multidisciplinaria de Proyectos Universitarios de Liderazgo y Superación Académica |
| IMTA: | Instituto Mexicano de Tecnología del Agua |
| MED: | Multiple Effect Distillation |
| MED-LE: | Multiple Effect Distillation Low Enthalpy |
| MSF: | Multi-State Flash |
| MVC: | Mechanical Vapour Compression |
| ORC: | Organic Rankine Cycle |
| PR: | Performance Ratio |
| RO: | Reverse Osmosis |
| TDS: | Total Dissolved Solids |
| TVC: | Thermal Vapor Compression |
| UNAM: | Universidad Nacional Autónoma de México |

REFERENCIAS

Libros

Cengel Y., Boles M. Termodinámica, séptima edición, McGraw Hill, México 2012.

DiPippo R. Geothermal Power Plants. Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact. Segunda edición.

Llopis G., Rodrigo V. Guía de la Energía Geotérmica, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. España.

Moratilla B. Y. Energía geotérmica: análisis y prospectiva. Colección: avances de ingeniería. Editan: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI y Universidad Pontificia Comillas. España.

Tesis consultadas

Alarcón R. *Propuesta de diseño de un intercambiador de calor tubular para el aprovechamiento de recursos geotérmicos de baja entalpía*, Facultad de Ingeniería UNAM, Ciudad Universitaria, México D. F. Marzo 2012.

García F. *Análisis del sistema de vacío de una planta de desalación MED con geotermia de baja entalpía*, Facultad de Ingeniería UNAM, Ciudad Universitaria, México D. F. 2013.

Pablo J. E. *Desalación de agua de mar con agua caliente utilizando procesos térmicos*, Facultad de Ingeniería UNAM, Ciudad Universitaria, México D. F. Abril 2009.

Rodríguez U. *Desalación por compresión mecánica del vapor utilizando agua caliente*, Facultad de Ingeniería UNAM, Ciudad Universitaria, México D. F. Mayo 2009.

Salmerón J. A. *Análisis y diseño de una desaladora de agua de mar de múltiple efecto con recurso geotérmico de baja entalpía MED-LE*, Facultad de Ingeniería UNAM, Ciudad Universitaria, México D. F. 2012.

Artículos

Al-Sahali M., Ettouney H. *Developments in thermal desalination processes: Design, energy, and costing aspects*, Desalination 214 (2007) 227–240.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). *Estadísticas del agua en México, edición 2011*. México D. F., Marzo 2011.

ECOAGUA INGENIEROS SL. *Desalación mediante compresión de vapor*. Artículo técnico 4. Edición 1. España. 18 abril 2009

Fuentes M., Ramírez A. *Desalación del agua: una alternativa para resolver la demanda de agua potable en I sur de la República Mexicana*. Revista Agua Latinoamérica. Septiembre-Octubre 2003.

Glade H. *Fundamentals of Thermal Processes*. DME Workshop Thermal Desalination of Saline Waters. Essen, Alemania. Enero 2009.

Gutiérrez H., Espíndola S. *Using Low Enthalpy Geothermal Resources to Desalinate Sea Water and Electricity Production on Desert Areas in Mexico*. Presentado en: Proceedings World Geothermal Congress. Indonesia, Abril 2010.

Mathioulakis E., Belessiotis V., Delyannis E. *Desalination by using alternative energy: Review and state of the art*. Desalination 203 (2007) 346–365.

Ordaz C. A., Flores M., Ramírez G. *Potencial geotérmico de la República Mexicana*. Revista mexicana de geoenergía, volumen 24, número 1. Enero-Junio 2011.

Pérez V., Bonilla C. B., Rodríguez M. E. *Seawater desalination in Mexican Pacific coast by a new technology: use and perspectives*. Desalination and Water Treatment. Enero 2013.

Ramilo L., Gómez S., Coppari N. *Tecnologías de proceso para desalinización de aguas*. Comisión Nacional de Energías Atómicas (CNEA). Año 3. Número 9/10. Argentina. Enero-Junio 2003.

Santoyo E., Torres I. S. *Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable*. CIE, UNAM. Revista Digital Universitaria, volumen 11, número 10. 1 octubre 2010.

Páginas de internet

Asociación Internacional de Geotermia: <http://www.geothermal-energy.org>

Comisión Federal de Electricidad: www.cfe.gob.mx

Comisión Nacional del Agua: www.conagua.gob.mx

Asociación Geotérmica Mexicana, A.C.: www.geotermia.org.mx

Global Water Intelligence: <http://www.globalwaterintel.com>

Instituto de Investigaciones Eléctricas: <http://www.iie.org.mx>

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: <http://www.imta.gob.mx>