



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

# **Refrigeración Térmica con Geotermia de Baja Entalpía**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Roberto Ramírez Sánchez

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



*Dedicado a mis queridos padres y a Gethzemani Grijalva*



# Agradecimientos

Tengo una profunda deuda con las personas involucradas para alcanzar el punto en el que ahora estoy. El reconocimiento a todas ellas está presente en mi mente y no lo olvido, la gratitud que salda tal deuda ha sido y es latente todo el tiempo. Enumerar a cada persona tomaría demasiadas páginas y sería una misión prácticamente imposible. De cualquier forma tomaré en el trabajo aquí mostrado, que únicamente representa el punto final de una carrera, un pequeño espacio para declarar este agradecimiento y destacar:

A mi familia inmediata, padres y hermanas, sencillamente no hubiera obtenido nada de esto sin su existencia. Gracias.

A Alfredo, Víctor, Jorge, Eduardo, Jerson<sup>1</sup> que fueron importante compañía en mis estudios, su presencia hizo de la cátedra un sitio ameno, placentero y sobretodo completo. Gracias.

A los profesores encargados de mis clases, no habrá fin a la universidad, y por lo tanto a la formación de profesionales con personas tan pacientes y tan entregadas como lo son ustedes. Gracias.

A la UNAM por ofrecerme desde hace muchos años los privilegios únicos que me han traído hasta aquí. Gracias.

Finalmente deseo reconocer y dar las gracias a las personas que contribuyeron a la realización de este proyecto final, que de la misma manera distingo:

Al ingeniero Víctor Zenón por su intervención exenta de obligación, resultando de mucha ayuda. Gracias.

---

<sup>1</sup> Nombres de pila

## *Refrigeración térmica*

Al grupo de trabajo iiDEA que me aportó valiosas herramientas y numerosas facilidades que significaron un gran apoyo, haciendo este trabajo más placentero. Gracias

# Contenido

Objetivos.....	16
1. Geotermia.....	17
1.1 Introducción.....	17
1.1.1 Energía geotérmica.....	19
1.1.2 Yacimientos geotérmicos .....	20
1.1.3 Rastreo de yacimientos.....	25
1.2 Aplicaciones de la geotermia.....	27
1.2.1 Balneología.....	27
1.2.2 Servicio doméstico.....	27
1.2.3 Extracción de minerales .....	28
1.2.4 Generación de energía eléctrica .....	29
1.2.5 Climatización .....	30
1.2.6 Cultivos agrícolas y acuicultura.....	32
1.2.7 Industria .....	33
1.3 Impacto ambiental de la geotermia.....	33
1.4 Geotermia en México.....	34
2. Refrigeración.....	41
2.1 Refrigeración y Aire acondicionado.....	42
2.1.1 Principales aplicaciones de la refrigeración.....	43

2.2	Ciclo de refrigeración.....	47
2.2.1	Coeficiente de operación.....	49
2.2.2	Capacidad de refrigeración .....	51
2.2.3	Efecto refrigerante.....	51
2.3	Tecnologías de refrigeración y aire acondicionado.....	52
2.4	Refrigeración en México .....	53
3.	Tecnologías de refrigeración a través de energía térmica.....	55
3.1	Ciclo de refrigeración por absorción.....	57
3.1.1	Ciclo de refrigeración por absorción de simple efecto.....	57
3.1.2	Ciclo de refrigeración por absorción de doble efecto .....	60
3.2	Ciclo de adsorción .....	61
3.3	Ciclo de sólido y líquido desecante.....	63
3.4	Ciclo por eyector .....	64
3.5	Comparación entre las tecnologías de refrigeración térmica. ....	68
3.5.1	Ciclo de absorción .....	68
3.5.2	Ciclo de adsorción .....	70
3.5.3	Ciclo de sólido desecante .....	70
3.5.4	Ciclo de líquido desecante .....	71
3.5.5	Ciclo por eyector .....	72
4.	Comparación de ciclos de refrigeración térmicos.....	73
4.1	Ubicación del sistema. ....	73
4.2	Simulaciones.....	74
4.2.1	Absorción.....	75

4.2.2	Ciclo por eyector .....	83
4.3	Comparación .....	91
4.3.1	Selección del ciclo.....	94
4.3.2	Ahorro esperado.....	97
5.	Conclusiones y trabajo futuro .....	99



# Índice de figuras:

Figura 1.1 Transformación de la morfología de los continentes en 200 millones de años (Tarbuck & Lutgens, 2005).....	17
Figura 1.2 Estructura interna de la Tierra.....	18
Figura 1.3 Esquema de un yacimiento geotérmico (DiPippo, 2007).....	21
Figura 1.4 Aplicaciones de la geotermia según la temperatura (Jiménez Aviña, 2015-II) .....	22
Figura 1.5 Variación de temperatura según la profundidad en Wetzlar, Alemania (Dr. Mands & Dr. Sanner, 1968).....	23
Figura 1.6 Funcionamiento básico de una bomba de calor (Dr. Mands & Dr. Sanner, 1968).....	31
Figura 1.7 Fruta tropical cultivada en un invernadero geotérmico (Fotografía de Icelandic Photo and Press Service, Reikiavik) .....	32
Figura 1.8 Ubicación de las plantas geotermo-eléctricas en México con su respectiva producción (Jiménez Aviña, 2015-II).....	35
Figura 1.9 Distribución mundial de la energía geotérmica (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008).....	36
Figura 1.10 Distribución de la geotermia en México .....	37
Figura 1.11 Mapa de México con puntos geotérmicos de temperaturas de entre 75 y 100°C (Caldera, 2015) .....	39
Figura 2.1 Principales aplicaciones de la refrigeración (Hua, Zhang, Liu, & Wu, 2012) .....	46
Figura 2.2 Ciclo de Carnot invertido .....	47
Figura 2.3 Ciclo de refrigeración por compresión .....	49
Figura 3.1 Refrigerador operado con calor .....	55
Figura 3.2 Ciclo de refrigeración por absorción de simple efecto .....	59
Figura 3.3 Ciclo de refrigeración por absorción de doble efecto.....	60

*Refrigeración térmica*

Figura 3.4 Costos de enfriador y equipo auxiliar para absorción y compresión (D. Rafferty) .....	61
Figura 3.5 Ciclo de refrigeración por adsorción .....	63
Figura 3.6 Ciclo con desecante.....	64
Figura 3.7 Ciclo de refrigeración por eyector.....	66
Figura 3.8 Eyector .....	67
Figura 4.1 Modelo de ciclo de absorción en ASPEN Plus.....	76
Figura 4.2 Capacidad de refrigeración generada para diferentes caudales de mezcla dentro del ciclo.....	79
Figura 4.3 Recurso geotérmico necesario para diferentes producciones de refrigeración .....	80
Figura 4.4 Comportamiento del ciclo variando la temperatura de refrigeración .....	82
Figura 4.5 Requerimientos de flujo geotérmico para diferentes temperaturas de refrigeración .....	83
Figura 4.6 Modelo del ciclo por eyector en ASPEN Plus.....	84
Figura 4.7 Variación del número de Mach en el eyector para el COP simulado.....	87
Figura 4.8 Producción de refrigeración variando el flujo de amoníaco total en el ciclo con un COP de 0.15.....	89
Figura 4.9 Flujo geotérmico requerido para las diferentes capacidades de refrigeración con COP de 0.15.....	90
Figura 4.10 Comportamiento del ciclo variando la temperatura.....	91
Figura 4.11 Comparación entre el ciclo por absorción y el ciclo por eyector.....	92
Figura 4.12 Comparación de ciclos ante una variación en la temperatura de refrigeración .....	93
Figura 4.13 Requerimiento geotérmico ante una variación de temperatura para ambos ciclos.....	94

# Índice de tablas:

Tabla 1. 1 Producción geotermoeléctrica mundial (Jiménez Aviña, 2015-II) .....	30
Tabla 1.2 Usos directos de la geotermia en México.....	38
Tabla 1. 3 Características de los pozos con temperaturas de entre 70 y 100 °C en México (IMPULSAIV, 2008) (INEGI, 2014).....	40
Tabla 4. 1 COP para diferentes variaciones de flujo en el circuito de refrigeración	87
Tabla 4. 2 Comparación de fracción de fluido de trabajo con la energía requerida por la segunda tobera y con el COP alcanzado .....	88
Tabla 4. 3 Comparación cualitativa entre el ciclo de absorción y por eyector .....	95
Tabla 4. 4 Comparación cuantitativa entre el ciclo de absorción y por eyector.....	96
Tabla 4. 5 Ahorro anual esperado por Tonelada de refrigeración.....	98

# Nomenclatura y abreviaciones:

Símbolo	Medida	Unidades SI
$COP$	Coeficiente de operación	(-)
$C_p$	Calor específico a presión constante	KJ/Kg K
$C_v$	Calor específico a volumen constante	KJ/Kg K
$M$	Número de Mach	(-)
$m$	Masa	Kg
$NTU$	Numero de transferencia de unidades	(-)
$P$	Presión	Pa
$Q$	Flujo de calor	W
$q_e$	Efecto refrigerante	J/Kg
$S$	Entropía	KJ/ K
$T$	Temperatura	K
<i>Ton de refrigeración</i>	Capacidad de refrigeración	
$\dot{V}$	Flujo volumétrico	m <sup>3</sup> /s
$W$	Trabajo	W

## Símbolos griegos

$\Delta$	Diferencia
$\varepsilon$	Razón de calor
$\gamma$	Relación entre calores específicos
$\rho$	Densidad
$\xi$	Fracción en masa de absorbente

### Subíndices

O	Estancamiento
A	Absorbente
e	Eléctrico
evap	Evaporador
h	Hora
H	Alta
L	Baja
R	Refrigerante
t	Térmico

### Superíndices

*	Crítico
•	Tasa

### Abreviaciones

COP	Coeficiente de operación
GWP	Potencial de calentamiento global
HVACR	Calefacción, ventilación, aire acondicionado y refrigeración
NTU	Número de transferencia de unidades
ODP	Potencial de deterioro de la capa de ozono
P-T-X	Presión, temperatura, fracción

# Objetivos:

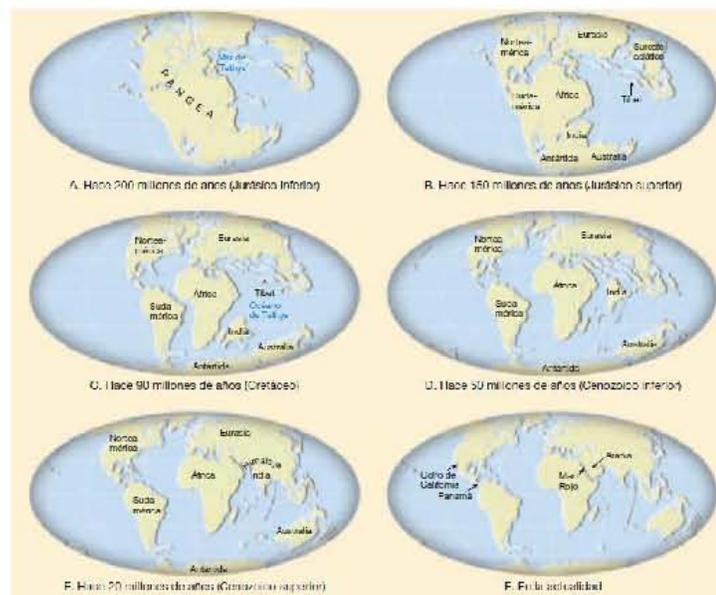
- Con miras a reducir impacto ambiental y promoviendo el uso de energías renovables así como la demanda eléctrica que crece conforme pasa el tiempo, el presente trabajo pretende generar opciones alternas al ciclo convencional de refrigeración por compresión el cual aun presenta un COP muy superior al resto de las tecnologías aquí estudiadas, de alrededor de cinco veces. Sin embargo con el análisis a realizar se espera observar un beneficio con el uso de las tecnologías de refrigeración con energía térmica mencionadas en el hecho de que su fuente energética sería la geotermia en zonas ya exploradas, disponibles y útiles y por lo tanto el suministro de energía no tendría un costo significativo frente al de la electricidad que consume el compresor en el ciclo convencional.
- Se planteará la posibilidad de usar geotermia para la implementación de ciclos de refrigeración térmicos. Ciclos que emplean energía térmica para su uso, manifestación directa de la energía geotérmica. Las tecnologías incluidas de refrigeración son: Absorción, adsorción, sólido desecante, líquido desecante y por eyector.
- Una comparación de desempeño entre el ciclo por absorción y por eyector siendo simulados en ASPEN Plus para un pozo geotérmico particular.
- Desarrollar una metodología aplicable para cualquier pozo geotérmico de baja entalpía que permita arrojar datos sobre el desempeño del ciclo por absorción y del ciclo por eyector según las condiciones del pozo geotérmico a explotar.

# Capítulo 1

## Geotermia.

### 1.1 Introducción.

La geología es la ciencia que persigue la comprensión del planeta Tierra. Entender la Tierra constituye un reto, porque nuestro planeta es un cuerpo dinámico con muchas partes que interactúan. En el transcurso de su larga existencia, la Tierra ha ido cambiando. Algunas veces los cambios son rápidos y violentos, como cuando se producen deslizamientos o erupciones volcánicas u otras veces los cambios tienen lugar de una manera tan lenta que no se aprecian durante toda una vida. (Tarbuck & Lutgens, 2005)



*Figura 1.1 Transformación de la morfología de los continentes en 200 millones de años (Tarbuck & Lutgens, 2005)*

Justamente para que dichos cambios puedan presentarse en nuestro planeta, es necesaria la acción de la energía, ya sea como emanación o siendo absorbida de alguna parte. Las emanaciones de energía pueden resultar beneficiosas para la humanidad o no. Las

## Refrigeración térmica

emanaciones perjudiciales van desde la actividad volcánica en una zona poblada, hasta un terremoto que destruya una población. Por otra parte, las emanaciones ventajosas pueden ser aprovechadas para obtener dicha energía o convertirla en otra que sea conveniente para nuestra civilización.

Nuestro planeta consiste en una corteza, la cual alcanza un espesor de alrededor de 20 a 65 Km en los continentes y de alrededor de 5 a 6 Km en los océanos, un manto de unos 2900 Km de espesor y un núcleo de aproximadamente 3470 Km de radio (Figura 1.2) (Dickson & Fanelli, 1988)

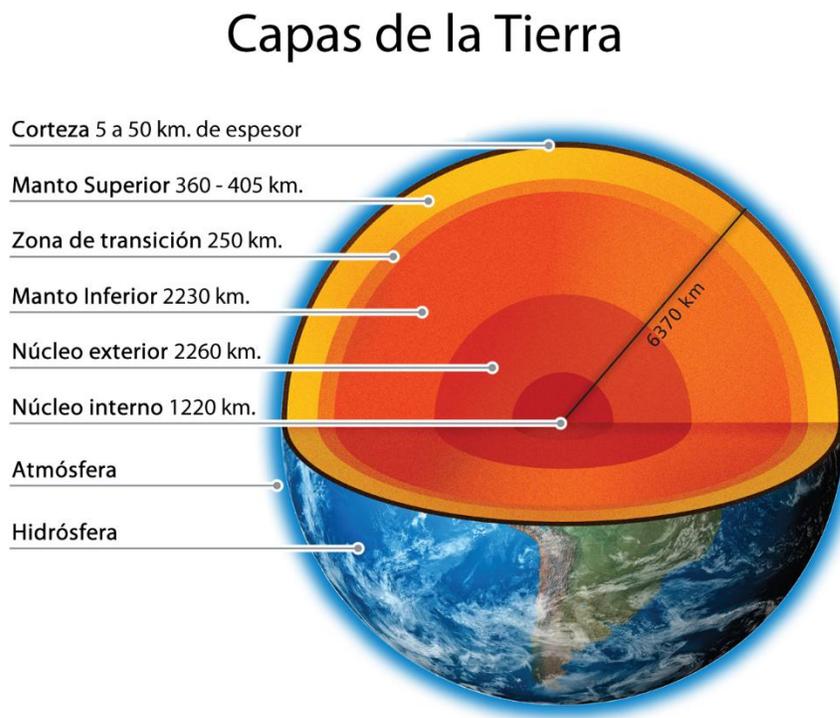


Figura 1.2 Estructura interna de la Tierra<sup>2</sup>

Adicionalmente existe la litosfera, capa frágil y quebradiza, que está formada por la corteza terrestre y parte del manto superior. Su espesor varía entre 70 y 150 Km.

<sup>2</sup> <http://cuadrocomparativo.org/cuadros-sinopticos-sobre-las-capas-de-la-tierra-para-usar/>  
(febrero de 2016)

### **1.1.1 Energía geotérmica**

El control y el intento de aprovechamiento de la energía proveniente de la Tierra a favor de la humanidad, no es una tarea sencilla ni mucho menos trivial, es una tarea que involucra muchas disciplinas. En ella participan: geólogos, geofísicos, geoquímicos, ingenieros, médicos, la acción legal por parte de abogados e incluso políticos. La energía de la que se hace referencia recibe el nombre de geotermia que se refiere a la energía térmica interna de la Tierra; en general, el término es empleado para denotar a los sistemas en los cuales el calor de la Tierra está lo suficientemente concentrado para formar un recurso energético llamado yacimiento geotérmico. (Rybach & Muffler, 1981).

La presencia de la energía en el interior del planeta Tierra procede del calor acumulado en su núcleo durante el proceso de formación y transformación del planeta y, fundamentalmente, de las radiaciones emitidas por la desintegración atómica de elementos químicos radiactivos presentes en el interior de la misma. El calor almacenado en el interior de la Tierra no se encuentra uniformemente distribuido, sino que es más elevado en el núcleo y de menor intensidad en la corteza dando lugar a lo que se conoce como gradiente térmico. (Jiménez Aviña, 2015-II)

La energía adopta muchas formas o manifestaciones y es a través de ellas que el ser humano trata de comprenderla y aprovecharla. Para lograr esto, requiere ser adaptada y transformada hasta poder obtener un uso de ella, por ejemplo, obtener energía mecánica o eléctrica.

La energía geotérmica puede ser clasificada como energía alterna y además renovable. Para entender este enunciado se toma en cuenta las siguientes definiciones:

Energía alterna: Las energías alternas son fuentes energéticas que serían una alternativa a otras tradicionales y que producirían un impacto ambiental mínimo. (Jiménez Aviña, 2015-II)

Energía renovable: Es aquella cuya fuente de obtención se renueva constantemente. Engloba una serie de fuentes energéticas que en teoría no se agotarían con el paso del tiempo. (Jiménez Aviña, 2015-II)

La organización de la Conferencia de Energía Mundial (WEC por sus siglas en inglés) ha considerado y presentado conclusiones, sugiriendo que: Considerando las masas continentales hasta una profundidad de 3 Km y comenzando a contar de una temperatura base de 15°C, la energía disponible geotérmica es de  $1.14 \times 10^8$  MWe, lo cual es alrededor de 120 veces la producción eléctrica mundial (H. & Armstead, 1989) Mientras que la producción eléctrica mundial hasta el 2013 es de 9889 TWh (InternationalEnergyAgency, 2014). Partiendo de estas cifras, la geotermia podría considerarse tan abundante como para ser considerada una fuente prácticamente infinita de energía; pero a escala local, un yacimiento geotérmico puede agotarse por su explotación prolongada.

Como se había mencionado anteriormente, se ve a la geotermia como otra opción de fuente energética, la cuestión es cómo sacar ventaja dadas sus particularidades. En la práctica se estudia y utiliza la energía térmica que es transportada a través de la roca y/o fluidos, desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma.

### **1.1.2 Yacimientos geotérmicos**

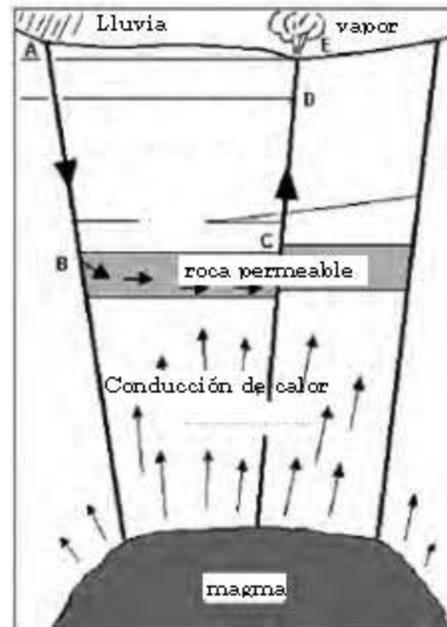
Como ya se dijo, la zona con el potencial de otorgar un recurso energéticamente útil es un yacimiento geotérmico, en estas zonas particulares se tiene un gradiente térmico por encima del promedio. El gradiente térmico es el aumento de la temperatura conforme aumenta la profundidad en la corteza terrestre. A profundidades accesibles, mediante perforaciones con tecnología moderna (10000 metros), el gradiente promedio es alrededor de 25 a 30 °C/Km. (Dickson & Fanelli, 1988)

Un yacimiento geotérmico tiene cinco características fundamentales para ser considerado una fuente geotérmica comercialmente viable:

- Una gran fuente de calor.

- Un yacimiento permeable.
- Un suministro de agua.
- Una capa superior de roca impermeable.
- Un mecanismo de recarga confiable.

En la Figura 1.3 se observa observar el esquema de un yacimiento geotérmico.



*Figura 1.3 Esquema de un yacimiento geotérmico (DiPippo, 2007)*

En la imagen se observa la entrada de agua de lluvia desde el punto A y se cuela a través de grietas y fracturas terrestres hasta entrar en contacto con las rocas calientes. La capa permeable ofrece un camino de baja resistencia y conforme el fluido se calienta, va disminuyendo su densidad tendiendo a elevarse dentro de la tierra. Mientras el fluido va ascendiendo, va perdiendo presión hasta que alcanza el estado termodinámico en el que se convierte en vapor, emanzando vapor como fumarola, vapor caliente o vapor saturado hacia la superficie. (DiPippo, 2007).

Existen yacimientos donde la capa superior es una formación con menor permeabilidad, cuya función es impedir que los fluidos geotérmicos se dispersen totalmente en la superficie y se conoce como capa sello.

Entre yacimientos situados en diferentes lugares, se pueden presentar variaciones de tamaño, profundidad, características geológicas, el modo de explotación, cantidad de líquido contenido o el nivel de temperatura. Como las variaciones a veces pueden llegar a ser muy grandes, es conveniente determinar una clasificación de ellos. Dentro de las clasificaciones más importantes está la que es por temperatura, dado que esta variable nos da un parámetro directo de la energía potencial total que el reservorio tiene. Este dato en principio determina la aplicación para la cual el yacimiento puede ser aprovechado. Como se puede observar en la Figura 1.4, las aplicaciones que tiene la geotermia dependen directamente de la temperatura.

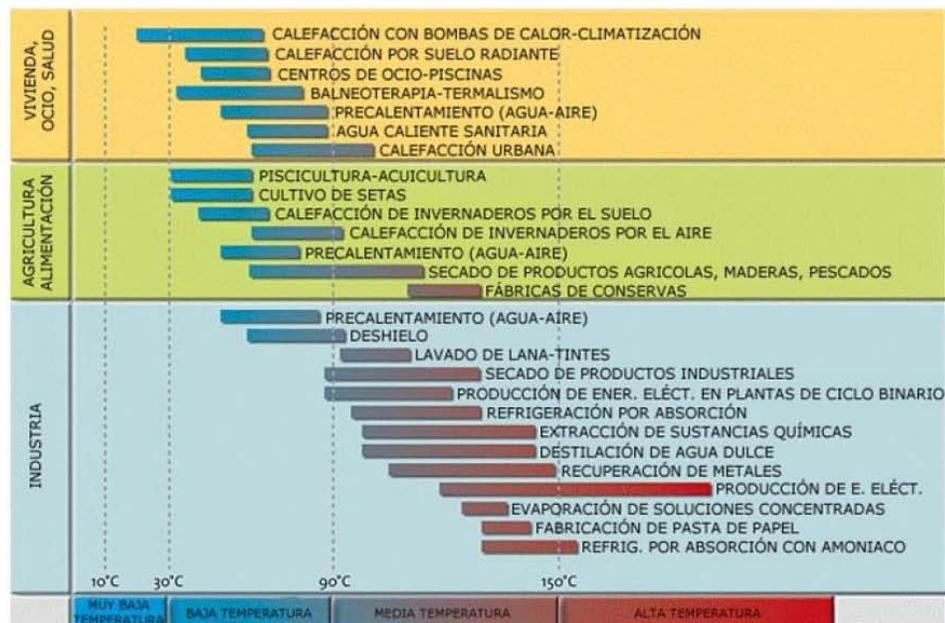


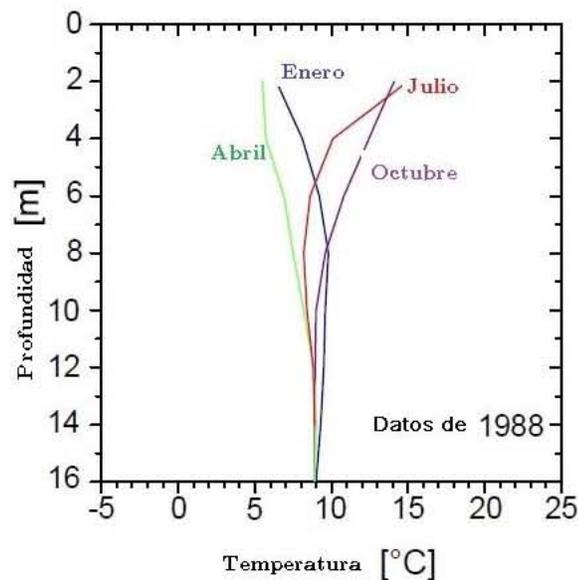
Figura 1.4 Aplicaciones de la geotermia según la temperatura (Jiménez Aviña, 2015-II)

### 1.1.2.1 Yacimientos de muy baja temperatura

Prácticamente toda la corteza terrestre podría representar un yacimiento de este tipo, menos de 30°C, con excepción de las interrupciones por masas de agua.

Usualmente este tipo de yacimientos es aprovechado para el uso de bombas de calor. A profundidades por debajo de los 15 m de profundidad la temperatura de la tierra es muy

sensible a las condiciones climáticas del exterior y por lo tanto a las estaciones del año, sin embargo, a profundidades mayores, la temperatura permanece constante prácticamente todo el año debido a la alta inercia térmica que tiene el suelo. Por ejemplo, en la Figura 1.5 podemos observar como las temperaturas convergen conforme la profundidad a una profundidad mayor de los 15 m, las mediciones fueron hechas en Wetzlar, Alemania. Aproximadamente a partir de los 20m de profundidad la temperatura va variando según el gradiente térmico de la región.



*Figura 1.5 Variación de temperatura según la profundidad en Wetzlar, Alemania (Dr. Mands & Dr. Sanner, 1968)*

### 1.1.2.2 Yacimientos de baja temperatura o baja entalpía

Son yacimientos geotérmicos de entre 30 y 90°C y pueden encontrarse en cuencas sedimentarias con un gradiente térmico promedio o medianamente superior. La condición geológica requerida es la existencia a profundidad adecuada, entre 1500 y 2500 metros de profundidad, de formaciones permeables, capaces de contener y dejar circular fluidos que extraigan el calor de las rocas.

Este tipo de yacimientos se encuentran en numerosas partes del mundo, por ejemplo, la Cuenca del Amazonas, la Cuenca del Mississippi, Cuenca de Artesiana, Pekin, las cuencas de París y algunas zonas de Hungría. (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008)

### **1.1.2.3 Yacimientos de media temperatura o media entalpía.**

Son yacimientos con recursos geotérmicos a temperaturas comprendidas entre 90 y 150°C, de igual manera al de baja entalpía, pueden encontrarse en numerosos lugares del mundo y en cuencas sedimentarias comprendidas entre 2000 y 4000 metros; con una elevada concentración de isótopos radioactivos (recordando que es de las principales fuentes de calor geotérmico); o en ámbitos similares a los de alta temperatura pero a menor profundidad.

Los yacimientos de este tipo son encontrados en un gran número de lugares muy específicos, donde debido a discontinuidades y fallas, el agua puede alcanzar la superficie, evidenciando su presencia con aguas termales. Estos yacimientos requieren de una intrusión magmática como fuente de calor, y de un reservorio con buena recarga; no cuentan con una capa impermeable sobre el reservorio que mantenga el calor y la presión dentro de él.

### **1.1.2.4 Yacimientos de alta temperatura**

Son yacimientos con fluidos geotermiales, o rocas calientes a más de 150°C, comprendidos en profundidades de entre 1500 y 3000 metros y se encuentran en zonas geográficas con gradientes térmicos de hasta 30°C/m. Suelen encontrarse en zonas con actividad sísmica elevada, formación de cordilleras en épocas geológicas recientes, con actividad volcánica reciente y en regiones volcánicas situadas en los bordes de placas litosféricas. La presencia de estas características se debe a la manera en que la energía interna de la Tierra es liberada, producida como movimiento de convección en el magma y como desplazamientos entre las placas litosféricas. El desplazamiento de estas placas, los bordes que las comprenden y las zonas especialmente frágiles de ella son focos de escape del magma, lo que básicamente origina a los volcanes. En el interior de estas zonas geológicas, se originan, gracias al manto, focos importantes de calor conocidos como puntos calientes. Estos puntos

calientes son la fuente de calor que posee el yacimiento, al ser esta su fuente, el yacimiento alcanza las temperaturas mencionadas.

Como ejemplos de estos yacimientos se puede mencionar mencionar Cerro Prieto en México, Otake en Japón y Wairakei en Nueva Zelanda. (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008)

### **1.1.3 Rastreo de yacimientos**

Según la definición de lo que es un yacimiento geotérmico, debe cumplir con ciertas características que lo hagan potencialmente útil para una determinada aplicación, y dependerá directamente de esta, el yacimiento que se busque. La presencia del recurso geotérmico depende de muchos factores. De la manera en que se describió anteriormente a los yacimientos, hace a esta energía no disponible en todos los sitios del mundo y aun siendo presente no siempre es viable su aplicación. El posible aprovechamiento de esta energía dependerá entonces, de un estudio completo de los lugares potencialmente aprovechables.

Conforme el paso del tiempo y desarrollo de técnicas y tecnologías para mejorar la obtención y ubicación de este valioso recurso, la ciencia toma importante relevancia involucrando de manera directa, la geofísica, la geoquímica, la geología y desde luego la ingeniería, llevando así, mano a mano entre estas ciencias el estudio íntegro para en primer lugar determinar la ubicación de un yacimiento.

#### **1.1.3.1 Geología**

La presencia de yacimientos geotérmicos como se ha mencionado, depende de una gran variedad de factores, así, la geología se ocupa del primer paso para la exploración de recursos geotérmicos. La geología que se encarga de estudiar el origen, formación y evolución de la Tierra ofrece desde ese punto de vista información sobre las áreas propensas a tener el recurso geotérmico, posible tamaño de algún yacimiento y también sugiere métodos de exploración sobre las áreas determinadas. De igual manera esta ciencia aporta información sobre la zona una vez explorada.

Los métodos que la geología ocupa, comienzan desde los fenómenos tectónicos que producen evidencias superficiales, como: subducción (Hundimiento de placas), emanaciones superficiales de vapor, discontinuidades o fallas geológicas, cadenas montañosas, hasta fenómenos no tan tangibles. Para ello se han desarrollado mapas geológicos, dónde por la historia y transición de la Tierra, existe posibilidad de un yacimiento; también existe el estudio de materiales volcánicos emitidos a la superficie, para determinar edad, composición y estructura, permeable o impermeable para dar una idea del límite y tipo de un posible yacimiento.

### **1.1.3.2 Geoquímica**

Esta ciencia tiene como objetivo analizar las muestras obtenidas de la exploración, determina si un yacimiento geotérmico es predominado por agua o vapor, la temperatura aproximada a la profundidad, los diferentes compuestos químicos que el fluido geotérmico tiene, así como los isótopos presentes, si el fluido tiene la suficiente pureza para emplearse directamente sobre el equipo extractor de energía o qué métodos pueden emplearse para purificarlo e incluso determinar la fuente de recarga del reservorio.

Durante la fase de exploración los estudios geoquímicos son muy importantes e indispensables, porque proporcionan datos que son útiles sobre la planificación, los costos y viabilidad del proyecto.

### **1.1.3.3 Geofísica**

La geofísica ocupa métodos más sofisticados para ponerse en práctica y por lo tanto más costosos. Los métodos geofísicos permiten identificar parámetros del suelo, a través de: gravimetría, resistividad eléctrica del suelo, perfil de temperaturas, velocidad de propagación de ondas elásticas y estudios magnéticos. Algunas de estas técnicas pueden proporcionar información sobre la forma, tamaño y estructura del yacimiento y sobre la ubicación del mismo para determinar puntos de perforación. El alto costo de estos métodos, orilla a los

exploradores a utilizarlos en menor medida y en muchos casos con el objetivo de detallar profundamente la prospección.

## **1.2 Aplicaciones de la geotermia.**

Las aplicaciones de la geotermia se pueden dividir en dos grandes grupos; generación eléctrica y usos directos que abarca prácticamente el resto de servicios ofrecidos por este recurso.

### **1.2.1 Balneología**

La balneología es la aplicación del calor de la tierra más antigua del mundo. Floreció en los días del imperio romano, en el que las termas se convirtieron en una institución, no sólo como centros de salud e higiene, sino también como centros de intercambio social. Los balnearios, hidrotratamientos y baños de chorro se extendieron por toda Europa y otras partes, y fueron frecuentados por inválidos, hipocondriacos y los que simplemente asistían a ellos por gusto. La balneología tiene lugar hasta nuestros días, y se ha extendido hasta el campo medicinal con la crenoterapia, hoy en día es además una fuente de turismo, dado que las áreas donde se dan el tipo de aguas termales tiene generalmente un paisaje atractivo incrementando las fuentes de ingreso para países con este recurso natural.

### **1.2.2 Servicio doméstico**

Los maoríes<sup>3</sup> adaptaron los fenómenos geotérmicos a sus necesidades domésticas desde que se establecieron en Nueva Zelanda en el siglo XIV, su vida tradicional y el aprovechamiento cotidiano de la geotermia que en ese entonces desarrollaron puede atestiguar en la actualidad. En un poblado cercano a Rotorua en la Isla del Norte puede verse que un pescador atrape una trucha en un río de agua fría y la deje caer en un estanque cercano de agua hirviente para cocerla. A unos cuantos metros de él, se verá a su esposa bañando al bebé con agua caliente geotérmicamente, mientras su hija está lavando la ropa

---

<sup>3</sup> Los maoríes son los tangata whenua, el pueblo indígena de Nueva Zelanda.

de la casa en un manantial caliente y las verduras se están cociendo sobre una fumarola. (H. & Armstead, 1989). Cada una de estas tareas ha sido realizada con un fluido geotérmico. Como se puede observar, el aprovechamiento en el servicio doméstico es bastante amplio y en zonas privilegiadas con este recurso, la aplicación es bastante extensa, prácticamente a todo procedimiento que requiera de calor.

Dentro del servicio doméstico una aplicación muy importante es la calefacción habitacional, existen muchos países con las bondades de la geotermia pero que por su posición en la tierra conviven con climas generalmente fríos. Estos países han optado por la utilización de geotermia como fuente calorífica. Por ejemplo Francia.

Francia es en la actualidad única en lo que toca a tener servicios geotérmicos de calefacción habitacional que derivan su calor de acuíferos de bajo grado situados en áreas no termales. El desarrollo francés de esta clase fue el de Melun, al sureste de París, abierto alrededor de 1970, al descubrir aguas calientes en una búsqueda por petróleo. En la región de París los gradientes de temperatura son de 30 a 35 °C/Km, ligeramente mayores que el promedio mundial. (H. & Armstead, 1989)

### **1.2.3 Extracción de minerales**

La extracción mineral es también una aplicación con bastante antigüedad. De la actividad geológica se extraían minerales como el ácido bórico para formar esmaltes que servían en la decoración. También se extraía azufre, vitriolo y alumbre, y se establecían industrias basadas en la producción de estos minerales.

Hernán Cortés también aprovechó la actividad geológica a su favor, obtenía minerales para fines militares. Cuando Hernán Cortés llegó a territorios aztecas, estos creyeron que su llegada se debía a la reencarnación del mitológico Quetzalcóatl, no sólo lo identificaron como tal por su misteriosa llegada desde el Atlántico, sino que una milagrosa erupción del Popocatepetl en ese mismo momento terminó por convencerlos. Ante tal erupción el conquistador aprovechó el azufre depositado en el cráter del volcán para producir pólvora.

La extracción de sustancias químicas de los fluidos termales continua en la actualidad, por ejemplo, en Japón y Taiwán se recupera el azufre de fumarolas y se extrae ácido sulfúrico y sales de amonio; se ha producido sal común, cloruro de calcio de salmueras calientes recuperadas de debajo de la arena del Mar Salton en el sur de California y se está estudiando la posibilidad de recuperar elementos valioso presentes en trazas en los fluido geotermiales.

### 1.2.4 Generación de energía eléctrica

El adelanto más espectacular que se ha logrado en la explotación del calor terrestre tuvo su primera manifestación cuando el Príncipe Ginori Conti promovió por primera vez la generación de energía eléctrica en Larderello Italia en 1904 (H. & Armstead, 1989). Como precursor de la generación eléctrica la máquina de pistón recíprocante que Ginori Conti utilizó, tenía muchos problemas de corrosión dado que el fluido geotérmico entraba en contacto directo con los mecanismos. Con el paso del tiempo, tanto las máquinas como los procesos de conversión de energía fueron desarrollándose, la principal manera de hacerlo, que en la actualidad se sigue empleando, fue el uso de un intercambiador de calor que transfiriera el calor del fluido geotérmico a un fluido de trabajo “limpio”, evitando la corrosión. De manera paralela se desarrollaron materiales capaces de soportar la corrosión y así evitar la pérdida de energía que es inherente a un intercambiador de calor.

En el año 2000, la capacidad geotermo-eléctrica instalada a nivel mundial era de 8000 MWe, pasando a 9000 MWe en 2005 (Jiménez Aviña, 2015-II). En la Tabla 1.1 se puede observar la generación de los países más productores a la actualidad. Hubo un crecimiento en la producción mundial y Estados Unidos encabeza la lista con una generación muy superior al resto de los países listados en la Tabla 1.1

País	MWe	País	MWe
Estados Unidos	3093.5	Rusia	81.9
Filipinas	1904	Turquía	81.6
Indonesia	1197.3	Papúa-Nueva Guinea	-
México	958	Guatemala	52

Italia	842.5	Portugal	28.5
Nueva Zelanda	628	China	24.2
Islandia	574	Francia	16.2
Japón	536	Alemania	8.1
El Salvador	204.4	Etiopía	7.3
Kenia	167	Austria	1.4
Costa Rica	165.5	Australia	1.1
Nicaragua	87.5	Tailandia	0.3
		<b>TOTAL</b>	<b>10357.7</b>

*Tabla 1.1 Producción geotermoeléctrica mundial (Jiménez Aviña, 2015-II)*

### **1.2.5 Climatización**

Del uso del calor terrestre se toma ventaja también para cambiar las condiciones de temperatura en un determinado recinto, como se marcó en el punto 1.2.2, se ha empleado desde tiempos remotos como fuente de calor para templar el ambiente de los hogares, sin embargo esta fuente de calor también se ha aprovechado como vía para el acondicionamiento de aire.

En el siglo XX, el pionero en la calefacción con geotermia fue Islandia, que inició una explotación en gran escala de su calor terrestre para calefacción distrital y suministro de agua caliente, no en escala pequeña, sino como sistema de suministro público similar a las redes de distribución de gas y electricidad. Como desarrollo complementario, más o menos simultáneamente, el enfriamiento de espacios se desarrolló por primera vez en Rotorua para un hotel, haciendo uso de un solo pozo geotérmico (H. & Armstead, 1989).

En la Figura 1.4 Se puede observar que a partir de 30°C las temperaturas son recomendadas como suministro de calefacción por bombas de calor, para una calefacción urbana es aproximadamente a partir de 50°C y existe dependencia entre la temperatura deseada al ambiente y la temperatura de la fuente. Por ejemplo en Beijing, República Popular China, se calentaban, en 1980, 50 000 m<sup>2</sup> de espacio de piso por medio de agua a 53

a 59°C, que era suficiente para mantener temperaturas ambiente de 15 a 20°C hasta en invierno.

Mucho depende de la calidad de aislamiento del edificio, y existe también la posibilidad de reforzar el suministro de calor en rachas de clima frío excepcionalmente severo por medio de combustible o electricidad adicionales o, incluso con bombas de calor (H. & Armstead, 1989).

Las bombas de calor, resultan muy prácticas como medio de calefacción, dado que, según su diseño, pueden operar como método de calefacción o de refrigeración, de acuerdo a la temporada del año.

La Figura 1.6 muestra el principio básico de una bomba para calor de fuente terrestre. Se puede extraer el calor del subsuelo a una temperatura relativamente baja. La bomba aumenta la temperatura con el uso de un fluido externo que es utilizada como sistema de calefacción. Para cada KWh de calefacción, se requiere sólo de 0.25 a 0.3 KWh de electricidad para operar el sistema. Como ya se indicó, para refrigerar, basta con invertir el sistema, y el calor proveniente del recinto es introducido a la tierra.

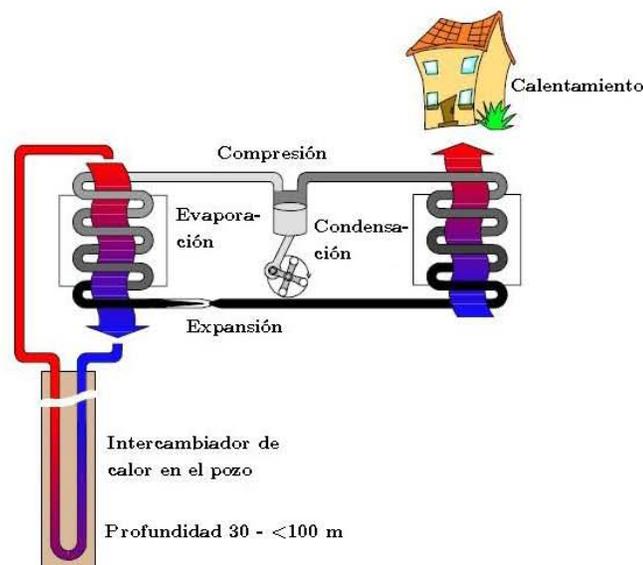


Figura 1.6 Funcionamiento básico de una bomba de calor (Dr. Mands & Dr. Sanner, 1968)

### **1.2.6 Cultivos agrícolas y acuicultura**

Esta es otra aplicación floreciente del calor de la tierra que fue practicada por primera vez en Islandia, utilizando aguas calientes naturales para calentar invernaderos en los que se cultivaban vegetales, fruta, hongos y flores; en un país donde estos productos no podían cultivarse en condiciones naturales del ambiente. Antes de eso, la mayoría de los productos y alimentos tenían que importarse a Islandia, pero con el uso del calor geotérmico los habitantes del lugar ya podían conseguir productos que antes sólo tenían a su alcance bajo precios exorbitantes.



*Figura 1.7 Fruta tropical cultivada en un invernadero geotérmico (Fotografía de Icelandic Photo and Press Service, Reikiavik)*

Hoy en día la utilización del calor en la agricultura se ha extendido hasta la cría de animales, el calentamiento del suelo, la cría de peces, la producción de leche, la incubación de huevos, la cría de gallinas, y la biodegradación de los desechos campo. Las aplicaciones de la agricultura requieren sólo de calor de bajo grado, que varía desde 20°C para la cría de peces, 40°C para el calentamiento de suelos y hasta 60°C u 80°C para calefacción de invernaderos. (H. & Armstead, 1989)

### **1.2.7 Industria**

Hablar de industria es referirse a una cantidad enorme de actividades que permiten al humano generar y prestar diferentes tipos de servicios. En la industria generalmente se es un gran consumidor de calor, algunas de calor de alto grado y otras de calor de bajo grado; esta situación ha producido una expansión mirando hacia el uso del calor terrestre. La primera aplicación industrial de gran escala del calor geotérmico fue iniciada en los años cincuenta en Kawerau, Isla del Norte, Nueva Zelanda, en donde los Molinos Tasman de Pulpa y Papel consumen aproximadamente 200 toneladas por hora de vapor de agua natural para fines de procesamiento del papel, que hoy en día pertenece a los procesos que más aprovechan este recurso.

El criterio para determinar si una industria debe optar para sus procesos el calor de la Tierra es su grado de intensidad de utilización del calor. Dentro de las industrias que sirven de este recurso podemos mencionar: Extracción de sales de sodio y magnesio del agua de mar, fermentación de melazas para producir alcohol etílico, butanol, acetona, ácido cítrico y otros productos, producción de proteínas, vitaminas y amoníaco, producción de azúcar de caña, producción de leche en polvo, cocimiento parcial del arroz, desecación de madera, fabricación de cerveza, industria de plástico, entre otros. (H. & Armstead, 1989)

## **1.3 Impacto ambiental de la geotermia.**

La explotación de la energía geotérmica tiene consecuencias que en comparación con otras fuentes energéticas renovables son bastante menores. Como principales efectos negativos que el uso de geotermia da lugar son:

- Deterioro visual de la zona explotada.
- Si no hay reinyección, agotamiento de reservorios.
- Efluentes emitidos al ambiente.
- Hundimiento del terreno.
- Ruido.

- Afectación a la vegetación y fauna.

(Lienau & Lunis, 1991)

## **1.4 Geotermia en México.**

La geotermia es una fuente renovable que se ha utilizado en México desde 1959 cuando empezó a operar la primera unidad geotermoeléctrica en el país, con 3.5 MW de capacidad, en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, actualmente fuera de operación (Le Bert, 2011). La explotación de la energía geotérmica en ese campo geotérmico inicialmente tuvo mucha promesa de beneficios por el éxito de las primeras perforaciones. Sin embargo nunca se obtuvo suficiente vapor para generar más de 600 KW. La planta dejó de operar en 1973.

La planta de Pathé representó un importante logro para México, pues lo colocó como el tercer país en el mundo en utilizar la geotermia en generación eléctrica, puso de manifiesto la capacidad de los ingenieros mexicanos que hicieron el trabajo y sirvió para capacitar a los cuadros técnicos que habrían de conducir en el futuro el desarrollo de la geotermia en México.

Después de Pathé, la Comisión Federal de Electricidad desarrollo los campos de Cerro Prieto en Baja California, Los Azufres en Michoacán y Los Humeros en Puebla.



Figura 1.8 Ubicación de las plantas geotermo-eléctricas en México con su respectiva producción (Jiménez Aviña, 2015-II)

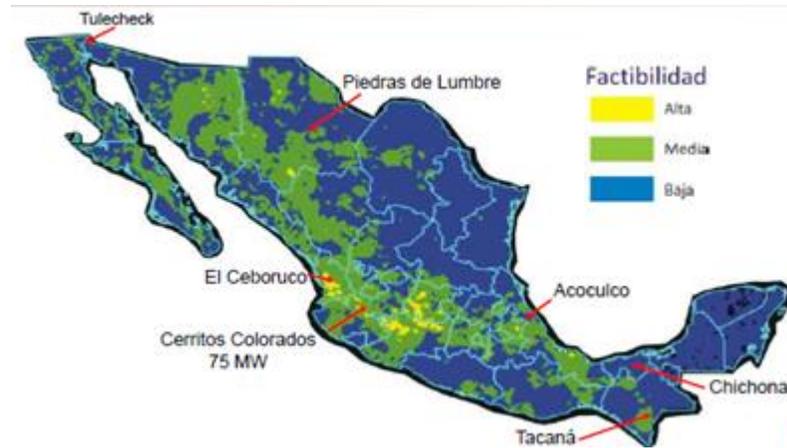
Como se puede observar en la Tabla 1.1 México es de los principales productores en la generación eléctrica mediante geotermia ocupando el cuarto lugar con 958 MWe. Esta producción eléctrica representa el 2.5% de la capacidad instalada en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) (Jiménez Aviña, 2015-II).

En México el recurso geotérmico es en gran medida abundante, dada su localización geográfica. El país se encuentra sobre una formación geológica conocida como el cinturón de fuego Figura 1.9 en rojo, que se extiende desde Chile y remonta al continente americano por el Océano Pacífico hasta Canadá, donde se desvía para alcanzar el continente asiático y parte de Oceanía. Esta formación geológica existe gracias al gran movimiento de placas tectónicas en esa zona, originando así energía geotérmica.



*Figura 1.9 Distribución mundial de la energía geotérmica (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008)*

De una manera más particular se puede centrar la atención sobre México y observar cómo se distribuye el recurso geotérmico en el país, cuya Figura 1.10 destaca las manifestaciones hidrotermales en cada zona por su temperatura, definiéndolas como alta, media y baja entalpía. Se observa que una parte importante del territorio cuenta con potencial geotérmico, que como ya se ha aludido, no significa que todos los lugares sean propensos a explotación, pero que de alguna manera da un indicio de la alta posibilidad de aprovechamiento energético. Las zonas con recursos geotérmicos de alta entalpía, ya son explotadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para la generación eléctrica (Cerro Prieto, Las Tres Vírgenes, Los Azufres, Los Hornos) mientras que las zonas de media y baja entalpía predominando en extensión son apenas usados para balneología.



*Figura 1.10 Distribución de la geotermia en México<sup>4</sup>*

Para este propósito se estima que más de 14,000 ton/h de vapor geotérmico son empleadas con una capacidad instalada de 156 MWt (Gutiérrez-Negrín, Maya-González, & Luis, 2015). Para aclarar mejor estas cifras, conviene mirar la Tabla 1.2, donde se aprecia que en realidad el único uso directo que se da a la geotermia es para balneología. Actualmente se tiene una alta expectativa sobre el futuro de este recurso debido a los marcos legales regulatorios y la fundación del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CMIE-Geo). En México ha cambiado la estructura de la industria energética y particularmente en el mercado de la energía geotérmica, debido a la reforma energética aprobada en el 2013.

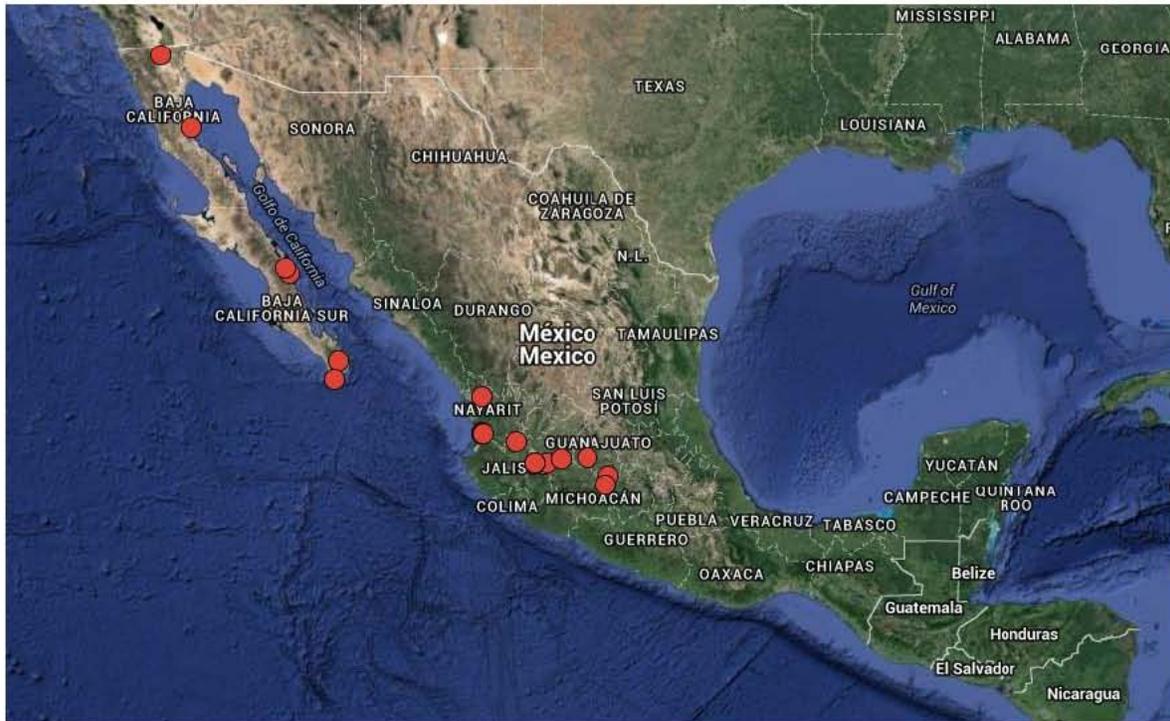
---

<sup>4</sup> Imagen tomada de <http://redereq.org.mx/wp-content/uploads/2013/01/Mapa-geotermico-nacional.png> con fecha de consulta (16/08/2015)

Uso	Capacidad instalada (MWt)	Uso Anual Energético (TJ/año)	Factor de Planta
Calefacción de Espacio Individual	0.460	4.297	0.303
Calefacción Distrital	0.000	0.000	0.000
Aire Acondicionado	0.000	0.000	0.000
Calefacción Habitacional	0.004	0.028	0.210
Piscicultura	0.000	0.000	0.000
Cría de Animales	0.000	0.000	0.000
Agricultura	0.007	0.067	0.300
Calor en Procesos Industriales	0.000	0.000	0.000
Derretimiento de Nieve	0.000	0.000	0.000
Balneología	155.347	4166.512	0.850
Otros Usos	0.000	0.000	0.000
Subtotal	155.819	4171.004	0.849
Bombas de Calor Geotérmicas	0.000	0.000	0.000
<b>TOTAL</b>	<b>155.819</b>	<b>4171.004</b>	<b>0.849</b>

Tabla 1.2 Usos directos de la geotermia en México

En México se han hecho varias exploraciones para emanaciones superficiales que indican la presencia de recursos geotérmicos. Por ejemplo en el mapa de la Figura 1.11 se puede observar los puntos de zonas geotérmicas con temperaturas de arriba de los 75°C y debajo de los 100°C.



*Figura 1.11 Mapa de México con puntos geotérmicos de temperaturas de entre 75 y 100°C (Caldera, 2015)*

Dentro de la Tabla 1.3 se muestran las localidades geotérmicas ya exploradas con las temperaturas de entre 70 y 100°C con su respectiva temperatura ambiente. Temperaturas de yacimientos de baja y hasta media entalpía.

Estado	Localidad Geotérmica	Longitud	Latitud	Temp °C	Temp Ambiente °C
Guanajuato	Balneario La Caldera	101.3200	20.2700	72.5	20.2
Jalisco	Los Borbollones- El Ortio 3	103.5300	20.5900	95	20.9
Jalisco	San Juan Cosala 4	103.1700	20.1800	78	20.9
Jalisco	San Juan Cosala 5	103.1600	20.1800	89	20.9
Michoacán	Hervideros	101.2830	20.0545	81	18.7
Michoacán	Agua Caliente	100.5300	19.3700	81	18.7
Nayarit	El Xinacate	105.0100	22.2100	70	22.9
Nayarit	Hevidero El Molote	105.0200	21.1400	90	22.9
Nayarit	El Chico Molote	105.0100	21.1300	86	22.9
Nayarit	Los Hervideros El Molote II	105.0000	21.1300	90	22.9
Baja California	La Joya	1163944.0300	31439.0100	82	17.8
Baja California	La Joya	116 3942.8500	314309.4000	98.3	17.8

Tabla 1.3 Características de los pozos con temperaturas de entre 70 y 100 °C en México (IMPULSAIV, 2008) (INEGI, 2014).

# Capítulo 2

## Refrigeración

La refrigeración se remonta desde tiempos remotos, mucho antes de desarrollar máquinas térmicas existen indicios de que las civilizaciones antiguas recolectaban el hielo producido naturalmente en invierno para utilizarlo después en verano, guardándolo en las zonas que consideraban más aisladas. Otras civilizaciones donde no nevaba comúnmente, no podían esperar la presencia del invierno para conseguir fuentes heladas, por ejemplo, civilizaciones como la mexicana, recolectaban la nieve que cubría las montañas y volcanes como el Popocatepetl y lo llevaban con mensajeros hasta Tenochtitlan para su posterior comercio.

La naturaleza no siempre pudo abastecer la demanda de frío que las civilizaciones necesitaban, y tampoco resultaban muy prácticos los métodos de almacenamiento y transporte, así que pronto se desarrolló la refrigeración artificial. La primera máquina para refrigerar tuvo como constructor al médico Juan Gorrie obteniendo la primera patente en Estados Unidos para la refrigeración mecánica. El principio básico de esta máquina era comprimir un gas, enfriarlo a través de un radiador y después expandirlo, teniendo como consecuencia un descenso de la temperatura en él, listo para absorber el calor del ente a enfriar. (Refrinoticias, 2010)

La industria de la refrigeración y climatización, mejor conocida como la industria de HVAC&R o HVACR por sus siglas en inglés *Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigeration* (calefacción, ventilación, aire acondicionado y refrigeración) actualmente es muy solicitada y forma parte de los procesos imprescindibles para la industria y para la vida cotidiana, sobre todo por la disponibilidad que la tecnología actual ofrece. Es por este hecho y por el empeño en reducir el impacto ambiental de cualquier proceso que es bastante estudiada, y mejorada. La Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE por sus siglas en inglés) es la sociedad técnica más

importante en el campo de HVACR, los miembros de esta sociedad están en todo el mundo compartiendo ideas, identificando necesidades, investigando y estableciendo estándares industriales para pruebas y puestas en práctica sobre este tema. De este modo la ASHRAE tiene una rama de investigación dedicada dar apoyo a cientos de compañías generando información sobre nuevos materiales y propiedades físicas para promover la aplicación de tecnologías innovadoras que a su vez mejoren e impulsen el desarrollo en el campo de HVACR

## **2.1 Refrigeración y Aire acondicionado**

Primeramente, es de vital importancia definir a que se refiere la palabra refrigeración, existen muchas definiciones similares; dentro de las cuales destaca: La refrigeración se define como la extracción artificial de calor, produciendo en un sistema una temperatura menor a la que podría tener bajo la influencia natural de sus alrededores. (Hua, Zhang, Liu, & Wu, 2012)

Mientras que el aire acondicionado acepta la siguiente definición: El aire acondicionado es el proceso de tratamiento de aire para controlar simultáneamente su temperatura, humedad, limpieza y distribución para obtener los requerimientos de confort de los ocupantes del espacio acondicionado. (ASHRAE, 2005)

Ambos campos están directamente relacionados, la refrigeración puede ofrecer al aire acondicionado el enfriamiento, la deshumidificación e incluso calentamiento (mediante bomba de calor). Sin embargo la refrigeración tiene más aplicaciones y el aire acondicionado requiere de otros procesos (humidificación, limpieza y distribución). Es por ello que estas industrias van de la mano pero no puede tratarse al aire acondicionado como una aplicación total de la refrigeración porque tiene que incluirse en su análisis el estudio del aire y la psicometría.

### **2.1.1 Principales aplicaciones de la refrigeración**

Como se ha hecho mención, la refrigeración forma parte de muchos procesos de la vida diaria, industriales y de investigación y juega un papel esencial formando parte del desarrollo sustentable.

#### **2.1.1.1 Confort y aire acondicionado**

El confort térmico y el aire acondicionado no sólo es aplicable a espacios residenciales, de oficina y comerciales, sino también en automóviles, aviones y medios de transporte, es decir, en cualquier espacio donde se tenga permanencia humana. Es una de las aplicaciones más importantes de la refrigeración.

El confort térmico, parte vital de la aire acondicionado va más allá de únicamente reducir la temperatura de algún espacio a fin de tener temperaturas más agradables al humano, es necesario además ofrecer un ambiente agradable para poder sentir comodidad más allá de la temperatura de un espacio, es por ello que el estudio y manejo del aire es indispensable en una aplicación como el aire acondicionado.

La ventilación, parte del manejo del aire, es sinónimo de renovación o reposición de aire sucio o contaminado por aire limpio, la ventilación es necesaria para reponer el oxígeno y evacuar los subproductos de la actividad humana. Existe la ventilación natural, resultado de los gradientes de temperatura en una zona incluyendo los espacios libres, y existe la ventilación forzada que proviene de la adición de energía a través de un ventilador, por ejemplo, hacia el recinto a ventilar para que el aire sea renovado. La elección de cada una depende en gran medida de los focos de contaminación dentro del espacio a ventilar y de que tanto éste se encuentre comunicado con el exterior. ([www.elaireacondicionado.com](http://www.elaireacondicionado.com), 2016)

Finalmente la humidificación encargada de añadir o extraer humedad al ambiente, ofrece una climatización adecuada según la necesidad de las personas en el recinto

### **2.1.1.2 Aire acondicionado industrial**

La diferencia con el punto anterior es que este acondicionamiento de aire está destinado a ofrecer las condiciones necesarias en el aire acordes a los requerimientos de procesos industriales tales como temperatura y humedad constante, por ejemplo, para maquinaria de precisión, impresión y procesos de fotografía, ambientes de laboratorio o cuartos de computación, incluso para el lanzamiento de satélites, donde la temperatura y humedad tiene que mantenerse constantes durante el lanzamiento.

### **2.1.1.3 Alimentos, enfriamiento farmacéutico y cadena de frío**

Alimentos como frutas y carnes son productos perecederos, mientras que muchos fármacos son sensibles al calor, por lo que es necesario almacenarlos en un espacio refrigerado. Frutas, verduras y carnes procesadas son almacenadas por varios meses a temperaturas a penas arriba de su punto de congelación para prolongar su vida, estas temperaturas van desde -15 a -30°C (Hua, Zhang, Liu, & Wu, 2012)

Métodos de enfriamiento de productos:

- Existe la tecnología de congelamiento rápido que en contraste con el congelamiento lento previene la formación de cristales grandes de hielo que dañan a los productos durante el descongelamiento. Para tal propósito existen diferentes tipos de tecnologías. Por ejemplo: El túnel de congelamiento mediante ráfaga de aire helado.
- El congelamiento mediante placas de congelación es otro método que consiste en colocar los productos con la superficie de un metal enfriado mediante un refrigerante. Los productos son presionados contra el metal. Las principales desventajas son que los productos deben tener un espesor uniforme y la razón de congelamiento es más lenta que otros métodos.
- Inmersión en líquido o spray consiste en sumergir o rociar un producto con un refrigerante que aún está líquido. Como refrigerante se utilizan soluciones

acuosas de: propileno, glicol, glicerol, cloruro de sodio, y mezclas de azúcar con sal. De las mayores ventajas de este método se puede mencionar que el proceso de refrigeración es muy rápido y se adapta bien a operaciones industriales continuas.

(Hua, Zhang, Liu, & Wu, 2012)

Por otra parte la cadena de frío es una cadena de suministro de temperatura controlada para productos perecederos y farmacéuticos. Las actividades de transporte y almacenamiento dentro de la cadena de frío deben mantenerse en un rango de temperatura específico según la naturaleza de los productos: La cadena de frío contempla las siguientes etapas: Almacenamiento en cámaras y almacenes frigoríficos en el centro de producción, transporte refrigerado, almacenamiento en los centros de distribución y mercado y finalmente el almacenamiento doméstico en refrigeradores.

#### **2.1.1.4 Industria y procesos de construcción**

La refrigeración toma un papel muy importante en procesos industriales y en la construcción (Hua, Zhang, Liu, & Wu, 2012):

- Procesamiento de alimentos: Muchos alimentos y productos que son origen de un proceso de fermentación que es un proceso exotérmico requiere control de temperatura, logrado a través de refrigeración.
- Procesos químicos: Funciones importantes en procesos químicos requieren de refrigeración tales como: remover calor de las reacciones, condensación y separación de gases, solidificación y licuefacción y mantenimiento de temperaturas bajas en líquidos.
- La refrigeración es ampliamente ocupada en procesos de construcción tales como presas dado el gran volumen de concreto utilizado. Durante el fraguado del concreto es necesario un control de temperatura para evitar

agrietamientos. Para lograrlo se hacen pasar tubos dentro del concreto fresco por los cuales pasa un refrigerante.

- Criomedicina: Es el área de la medicina concerniente a las propiedades de las células a bajas temperaturas, las aplicaciones principales son: Criocirugía y criopreservación.
- Superconductores y superfluidos: La física a bajas temperaturas estudia las propiedades de la materia a temperaturas donde el carácter cuántico de una sustancia se vuelve observable tal como superconductividad y superfluidad. Por lo que para observar tales características es necesario refrigerar las sustancias mediante diferentes métodos.

A modo de resumen, la Figura 2.1 presenta las principales aplicaciones de la refrigeración y su región de temperatura.

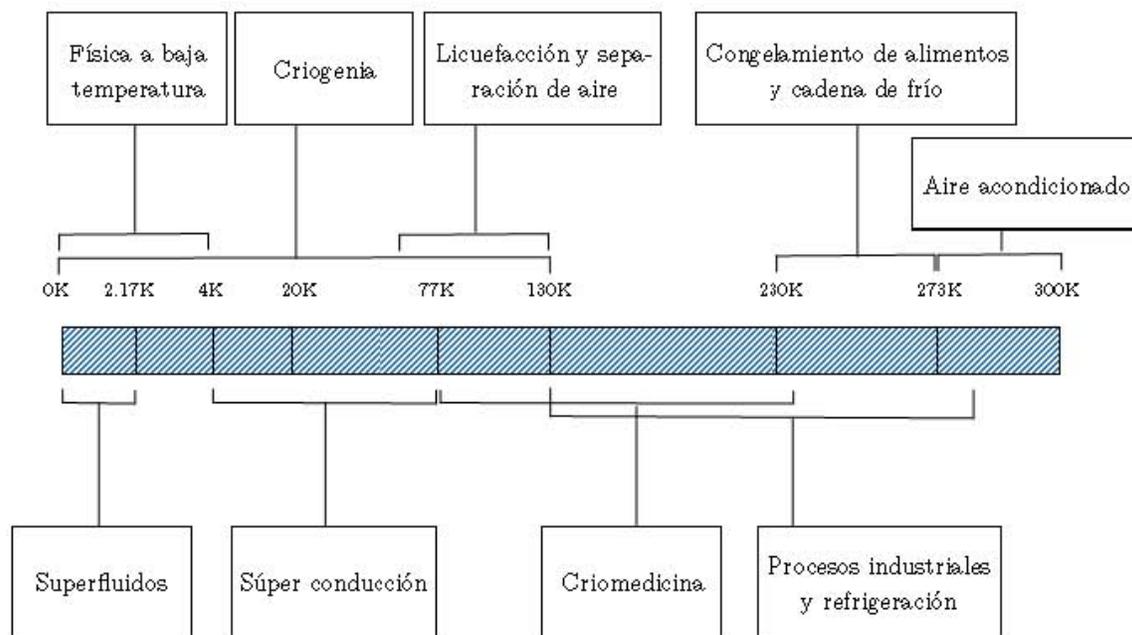


Figura 2.1 Principales aplicaciones de la refrigeración (Hua, Zhang, Liu, & Wu, 2012)

## 2.2 Ciclo de refrigeración

Como ya se ha hablado, la refrigeración artificial representa un gran logro tecnológico preciso en la vida humana. Como desarrollo tecnológico, tiene detrás, una serie de teorías, leyes y principios científicos. La refrigeración artificial así, se consigue mediante máquinas térmicas inversas. Máquinas con ciclos termodinámicos en los que el resultado final es tener un flujo de calor de una cierta temperatura a otra más alta, gracias a la adición de energía al sistema en forma de trabajo mecánico o de calor (Ciclo de Carnot invertido) Figura 2.2. En los ciclos de refrigeración comunes interviene un fluido refrigerante que sufre transformaciones termodinámicas, estos cambios de estado son principalmente los cambios de fase. Cada fluido o refrigerante, tiene sus propiedades termodinámicas que desde luego son tales que posibilitan la absorción del calor que se busca en un proceso de refrigeración.

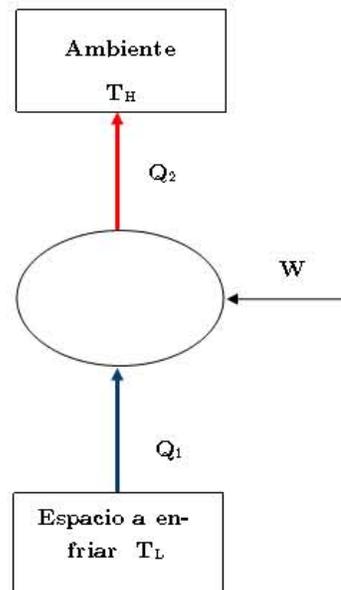


Figura 2.2 Ciclo de Carnot invertido

Dentro de los ciclos de refrigeración, los más comunes son los que emplean compresión del refrigerante como método de adición de energía o los que utilizan calor, como el ciclo de absorción. Existen además otros ciclos y métodos capaces de producir refrigeración, dentro de los que destacan: el ciclo termo eléctrico, ciclo magnético y criogenia. Actualmente estos

## *Refrigeración térmica*

mecanismos de refrigeración se encuentran en experimentación, tienen escasas aplicaciones y por lo tanto no resultan competitivos frente a los convencionales.

El ciclo de refrigeración más conocido y con un uso muy significativo tanto en la industria como en el hogar es el ciclo por compresión que tiene un coeficiente de operación (COP) de alrededor de 5, es decir, por cada unidad de energía introducida al sistema de refrigeración, se obtienen 5 unidades de energía sustraída al sistema o producción de refrigeración. De la Figura 2.2:

$$COP = \frac{Q_1}{W} \qquad \text{Ec. 2.1}$$

Dónde:

$Q_1$ : Producción de refrigeración

$W$ : Energía suministrada al ciclo

Durante el ciclo por compresión, el refrigerante en forma de gas a baja presión, entra al compresor elevándolo a la alta presión del sistema. Este gas caliente presurizado entra a un condensador colocado en la parte exterior del espacio a enfriar. Un ventilador impulsa aire contra el condensador para rechazar el calor que el refrigerante lleva, cambiando de estado gaseoso a líquido, a continuación, el refrigerante pasa a través de una válvula de estrangulamiento, donde la presión y temperatura del fluido decrece al punto necesario para que el proceso de evaporación pueda ocurrir en el evaporador. El calor requerido para la evaporación proviene del espacio a enfriar, resultando en un descenso de la temperatura del mismo. Un esquema del ciclo de refrigeración por compresión se muestra en la Figura 2.3

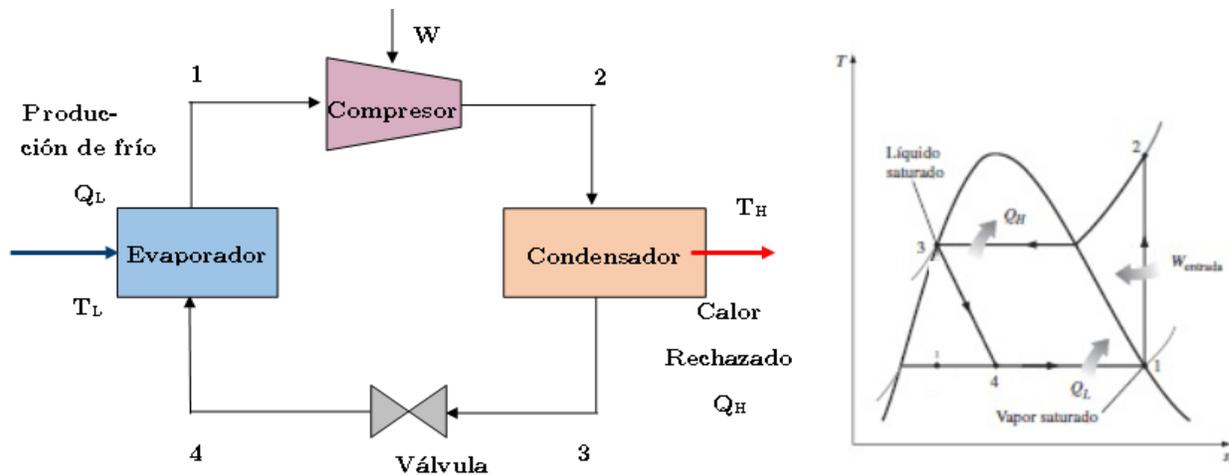


Figura 2.3 Ciclo de refrigeración por compresión

Dónde el calor rechazado del condensador es hacia un depósito de calor, que se considera ser lo suficientemente grande como para mantenerse a temperatura constante independientemente de la cantidad de calor rechazada. La producción de frío viene de un depósito de calor que igualmente se considera a temperatura constante

En un proceso de refrigeración, hay muchos aspectos y variables a considerar cuando se diseña un sistema para tal propósito. Es muy importante considerar que en esencia se trata de un proceso de transferencia de calor referido a un sistema, por lo que la naturaleza del fenómeno es explicado mediante las leyes de la termodinámica. Así el balance de energía en un sistema de refrigeración en su forma más esencial (Figura 2.2) queda:

$$Q_1 + Q_2 + W = 0 \quad \text{Ec. 2.2}$$

### 2.2.1 Coeficiente de operación

El coeficiente de operación como ya se ha hecho mención es un parámetro que describe el comportamiento de un ciclo en términos de eficiencia. Por lo que resulta en un parámetro muy importante al momento de considerar la aplicación de un ciclo de refrigeración. Este proceso como ciclo, en forma general es un proceso donde las propiedades de la sustancia analizada sufren determinados cambios de tal forma que lleguen a su estado

## Refrigeración térmica

original, es decir, todos los parámetros y propiedades termodinámicas del medio portador de energía son iguales al inicio y al final del ciclo.

Combinando las Ec. 2.1 y Ec. 2.2 y utilizando la nomenclatura de la Figura 2.3 llegamos a que el COP para un ciclo de Carnot invertido queda:

$$COP = \frac{Q_L}{W} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Si analizamos el sistema completo, es decir, incluyendo los espacios a enfriar y el ambiente (depósitos de calor), la segunda ley de la termodinámica nos dice que tratándose de un sistema aislado, el cambio en la entropía es positivo o en el caso ideal igual a cero. Así aplicando la ley para un caso ideal tenemos que:

$$\begin{aligned} \Delta S_H &= \frac{Q_H}{T_H}; \Delta S_L = \frac{Q_L}{T_L} & \text{Ec. 2.4} \\ \Delta S_{ciclo} &= 0 \end{aligned}$$

Dónde:

$\Delta S_H, \Delta S_L$ : Cambio de entropía en el depósito de calor caliente y frío, respectivamente

$\Delta S_{ciclo}$ : Cambio de entropía en el ciclo

El incremento de entropía en un ciclo es cero. Entonces haciendo el balance entrópico:

$$\Delta S_H + \Delta S_L + \Delta S_{ciclo} \geq 0 \quad \text{Ec. 2.5}$$

Que para el caso ideal la Ec. 2.5 se vuelve una igualdad. Sustituyendo los valores correspondientes a cada término llegamos a:

$$\frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_L}{T_L} \xrightarrow{\text{Despejando}} \frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Por lo que al sustituir esta expresión en la Ec. 2.3 obtenemos la forma del COP de Carnot:

$$COP_{Carnot} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} \quad \text{Ec. 2.7}$$

El caso de Carnot siendo el caso ideal nos dice que el COP tiene un valor máximo dependiente de la temperatura de los depósitos de calor.

### 2.2.2 Capacidad de refrigeración

La medida del trabajo realizado por un ciclo de refrigeración es la razón de extracción de calor del cuerpo o espacio a ser enfriado  $\dot{Q}_e$ . Esta razón de transferencia de calor ( $Q_L$  de la Figura 2.3) recibe el nombre de capacidad de refrigeración medida según el SIU en watts. Existe una unidad muy importante que ha sido utilizada muy comúnmente llamada como tonelada de refrigeración que es la capacidad de refrigeración necesaria para hacer una tonelada de hielo por día a 0°C.

$$1 \text{ ton de refrigeración} = 3.51 \text{ KW} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Existe otro término muy similar que es la carga de refrigeración que de la misma manera que la capacidad de refrigeración mide la transferencia de calor desde del espacio a enfriar hacia el evaporador, este parámetro lo hace poniendo énfasis en lo que se demanda hacer al refrigerante.

### 2.2.3 Efecto refrigerante

El efecto refrigerante es la capacidad de refrigeración por unidad de flujo másico del refrigerante, expresado como:

$$\text{efecto refrigerante} = \dot{q}_e = \frac{\text{Capacidad de refrigeración}}{\text{flujo másico de refrigerante}} = \frac{\dot{Q}_e (W)}{\dot{m} \left( \frac{kg}{s} \right)} [=] \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad \text{Ec. 2.9}$$

El efecto refrigerante indica la habilidad de refrigeración del refrigerante en el ciclo que depende propiamente de las características de dicho refrigerante y no del tamaño del ciclo.

El efecto refrigerante se mide también con el flujo volumétrico, llamándose efecto volumétrico refrigerante, expresado como:

$$\begin{aligned} \text{efecto volumétrico refrigerante} = \dot{q}_v &= \frac{\text{Capacidad de refrigeración}}{\text{flujo volumétrico de refrigerante}} && \text{Ec. 2.10} \\ &= \frac{\dot{Q}_e (W)}{\dot{V} \left( \frac{m^3}{s} \right)} [=] \left[ \frac{J}{m^3} \right] \end{aligned}$$

Donde:

$$\dot{V} = m \cdot v \quad \text{Ec. 2.11}$$

$v$  es el volumen específico del refrigerante antes del compresor

Este parámetro es de especial interés a la entrada del dispositivo que eleva la presión porque está relacionado con el tamaño de este.

## 2.3 Tecnologías de refrigeración y aire acondicionado

Actualmente existe una gran variedad de tecnologías destinadas para el propósito de la refrigeración, sin embargo dada la naturaleza de otro proceso importante que es el aire acondicionado, las tecnologías correspondientes se han visto especializadas y separadas de la refrigeración aun siendo ambas destinadas a disminuir temperaturas, principalmente porque el aire acondicionado tiene que ofrecer un confort térmico a las personas que se encuentren en el recinto acondicionado.

Como ya se ha hecho mención, la industria de la refrigeración forma una parte muy importante de los procesos industriales y residenciales dando lugar a que este mismo proceso tenga una participación y demanda muy amplia en el sector energético a nivel global:

- Aproximadamente el 15% del consumo global de energía es para refrigeración.
- El consumo de energía para generar frío superará consumo para generar calor.
- Aproximadamente el 40% del consumo de esta energía es para áreas urbanas.
- Pérdida de hasta el 40% en refrigeración de alimentos a lo largo de la cadena de frío.
- Refrigerador y aire acondicionado principal inversión en familias de escasos recursos (después de luz y TV).

- En hogares pobres, hasta el 80% de los costos de energía provienen del refrigerador.  
(Zurita, 2013)
- La electricidad empleada en los sistemas de refrigeración por compresión contribuye con el 15% de la producción mundial de CO<sub>2</sub> (Masoud Rezk, 2012).

Estos datos reflejan la gran presencia de este proceso en la civilización y además la necesidad de mejorar y mejorar la eficiencia del proceso.

A su vez, el ciclo de refrigeración es significativamente utilizado en sistemas de aire acondicionado, demandando así altas cantidades de energía para su implementación. De acuerdo a la Agencia Internacional de Energía (2012), la demanda de energía en el mundo aumentará en un 35% desde el 2010 al 2035. Un incremento asociado al crecimiento poblacional y económico, que conlleva de forma general a un calentamiento global, por ejemplo en Estados Unidos la temperatura es 3.2 °C más alta de lo normal. El resultado es un incremento en el uso de sistemas de aire acondicionado, contribuyendo así al aumento de demanda energética. Estos sistemas han pasado de ser un lujo a una necesidad esencial para las personas. (Al-Alili, Hwang, & Radermacher, 2013)

## **2.4 Refrigeración en México**

En nuestro país, empresas especializadas en labores de manufactura y construcción trabajan lado a lado con el sector HVAC&R para ofrecer cada vez mejores procesos y equipos. Como este sector pertenece directamente a la industria, se relaciona con la dinámica mercantil y por lo tanto, su estado actual está influenciado multidisciplinariamente, viéndose afectado por la situación social y por las reformas que entran en vigor e involucrándose en él, sectores económicos, administrativos e industriales además del ingenieril del que se ocupa este trabajo.

### *Refrigeración térmica*

En México del consumo total de energía en el hogar tenemos que un 25% es destinado refrigeradores y un 55% para aire acondicionado para clima cálido y de 30% en refrigeración para climas templados. (FIDE, 2009). Las cifras estadísticas de este tipo oscilan frecuentemente y muchas veces dependen de la naturaleza de los estudios y de los métodos de adquisición de datos por lo que sólo representan una idea del alto consumo energético que demanda este proceso en México.

# Capítulo 3

## Tecnologías de refrigeración a través de energía térmica

Los ciclos de refrigeración a través de energía térmica también conocidos como refrigeradores operados con calor, son en los cuales el efecto de refrigeración se obtiene con la adición de energía al ciclo de prácticamente solo una fuente de térmica (Figura 3.1), esta categoría se reduce principalmente a los ciclos de sorción, donde un material, ya sea líquido o sólido actúa como un compresor químico para el refrigerante. Existe otro ciclo muy conocido llamado ciclo de refrigeración por eyector que no puede llamarse de sorción dado que únicamente interviene una sustancia en el ciclo, pero que también forma parte de los ciclo de refrigeración térmicos. A su vez estos pueden ser divididos como de ciclo abierto o de ciclo cerrado. En los ciclos abiertos, el refrigerante está expuesto a la atmósfera, mientras que los cerrados, el refrigerante está en un circuito cerrado. Aislado del ambiente.

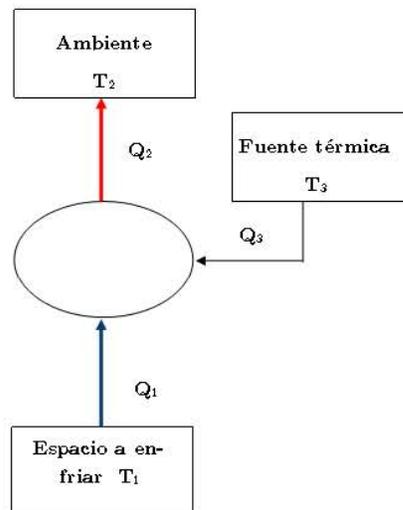


Figura 3.1 Refrigerador operado con calor

## Refrigeración térmica

Este tipo de refrigeración es una alternativa a los ciclos convencionales por compresión y tienen su mayor presencia cuando hay una fuente de calor de desecho o una fuente energética en forma de calor abundante. La principal diferencia es que prácticamente toda la energía suministrada al ciclo es de tipo térmica y no mecánica.

La eficiencia de refrigeradores operados con calor expresada como  $\varepsilon$  es llamada razón de calor:

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{Q_3} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Que de forma análoga tiene la forma del COP siendo el cociente entre el calor retirado entre la entrada de energía necesaria.

Haciendo un balance energético de la Figura 3.1 tenemos que:

$$Q_2 = Q_1 + Q_3 \quad \text{Ec. 3.2}$$

De este modo el análisis de la Segunda Ley de la Termodinámica se lleva a cabo de modo similar al de la Ec. 2.5, para la Figura 3.1:

$$\Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 + \Delta S_{\text{ciclo}} \geq 0 \quad \text{Ec. 3.3}$$

Para un proceso reversible, tenemos que:

$$\Delta S_1 = \frac{-Q_1}{T_1}; \Delta S_2 = \frac{Q_2}{T_2}; \Delta S_3 = \frac{-Q_3}{T_3} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Sustituyendo en la Ec. 3.3 para un proceso reversible tenemos que:

$$\frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_3}{T_3} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Combinando la Ec. 3.5 con la Ec. 3.2 y despejando, llegamos a que:

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \varepsilon = \left[ \frac{T_1}{T_2 - T_1} \right] \cdot \left[ \frac{T_3 - T_2}{T_3} \right] \quad \text{Ec. 3.6}$$

## **3.1 Ciclo de refrigeración por absorción**

Este ciclo pertenece al grupo de ciclos cerrados. La tecnología de absorción está bien desarrollada y su origen remonta a 1858, dónde el ingeniero francés Ferdinand Carré aplicó este efecto descubierto previamente por Michael Faraday al primer refrigerador por absorción.

El ciclo de absorción es un proceso mediante el cual el efecto de refrigeración es producido gracias a dos fluidos y a la adición de calor, en lugar de una adición de potencia provista por el compresor como ocurre en un ciclo de refrigeración convencional. Las principales diferencias entre estos dos ciclos son el método de adición de energía y el método para circular el refrigerante. Las máquinas de absorción disponibles comercialmente tienen dos grandes configuraciones. Para aplicaciones a refrigerar por encima de los 0°C, el ciclo utiliza bromuro de litio como absorbente y agua como refrigerante. Para aplicaciones por debajo de los 0°C, el ciclo utiliza amonio como refrigerante y agua como absorbente. (D. Rafferty). Sin embargo otros pares de fluidos han sido empleados y se mantienen en pruebas para caracterizar su comportamiento.

### **3.1.1 Ciclo de refrigeración por absorción de simple efecto**

El funcionamiento del ciclo consiste en dos circuitos Figura 3.2, uno dónde se produce el efecto de refrigeración y por dónde circula la sustancia refrigerante (a la derecha) y otro donde se suministra la energía al ciclo a través del cual circula una mezcla de los dos fluidos, el absorbente y el refrigerante (a la izquierda). Para entender el ciclo es importante mencionar que la reacción ocurrida al contacto de ambas sustancias es exotérmica, así que el calor de la absorción debe ser rechazado al ambiente. El ciclo comienza en el absorbedor dónde la solución diluida en absorbente es bombeada hacia el generador. Esta a su vez es calentada en el generador mediante la fuente externa de energía térmica liberando el refrigerante de la solución en forma de vapor, quedando en el circuito de potencia una solución concentrada en absorbente. El vapor del refrigerante, entonces fluye al condensador

donde pasa a fase líquida para ser dirigido a través de una válvula de estrangulamiento hacia el evaporador, donde ocurre el efecto de enfriamiento, dicho de otra manera, el refrigerante condensado reduce su presión en la válvula mencionada disminuyendo además su temperatura, así, en el evaporador, el refrigerante cambiará de estado a vapor, resultado del calor extraído del recinto a enfriar, para ser absorbido nuevamente en forma de gas en el circuito de potencia. Por otro lado la solución concentrada proveniente del generador en el circuito de potencia, vuelve al absorbedor pasando por una válvula de estrangulamiento y liberando calor para tener las condiciones termodinámicas necesarias para reiniciar el ciclo. Con intención de aumentar la eficiencia del ciclo, un intercambiador de calor es instalado entre el flujo de solución fría y diluida que va del absorbedor al generador y el flujo de la solución caliente y concentrada que va desde el generador, recuperando así, calor sensible en la solución diluida

Los enfriadores por absorción de simple efecto requieren de entre 70 y 100°C para operar y alcanzar un COP de alrededor de 0.7. Existen algunos que trabajan incluso con temperaturas de 55°C pero operan a un COP inferior. (iea, 2012). Se ha demostrado que conforme la temperatura en el generador aumenta, el valor del COP aumenta también con una tendencia asintótica a un valor constante (Llopis, Cabello, Sánchez, & E., 2010).

Dependiendo del par de fluidos empleados, el rango de temperaturas alcanzadas puede ir desde -10 hasta 15°C de refrigeración.

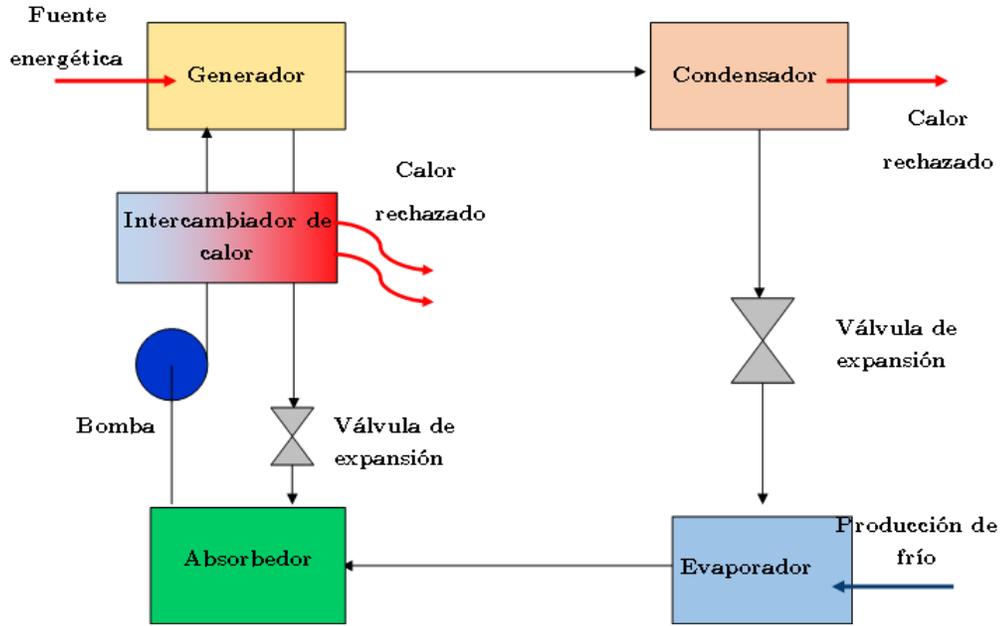


Figura 3.2 Ciclo de refrigeración por absorción de simple efecto

Como es de esperarse las propiedades de la solución variarán de acuerdo a la composición de la misma. La composición varía de acuerdo a la fracción que cada fluido aporte a la mezcla. Así la fracción en masa del absorbente está determinada por:

$$\xi = \frac{m_A}{m_A + m_R} \quad \text{Ec. 3.7}$$

Mezclando las partes de los dos circuitos  $m_1$  y  $m_2$  con fracción en masa  $\xi_1$  y  $\xi_2$  respectivamente, producen una solución con una fracción  $\xi_3$ . Haciendo un balance de masa y sabiendo que la masa de absorbente se mantiene constante, tenemos que:

$$(m_1 + m_2)\xi_3 = m_1\xi_1 + m_2\xi_2 \quad \text{Ec. 3.8}$$

Despejando la relación entre masas:

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{\xi_3 - \xi_1}{\xi_2 - \xi_3} \quad \text{Ec.3.10}$$

Por otro lado, el grado en que el refrigerante sea liberado del absorbente dependerá de la temperatura alcanzada en el generador. Entonces la presión del vapor de refrigerante estará determinado por su temperatura y por su fracción en masa. Esta relación se puede

observar en un diagrama de equilibrio P-T-X para el par de fluidos empleados en el ciclo de absorción.

### 3.1.2 Ciclo de refrigeración por absorción de doble efecto

Esta es una modificación del ciclo anterior y consta de dos generadores operados en serie a diferentes temperaturas que permiten alcanzar mayores valores de COP, en el rango de 1.1 a 1.2, sin embargo las temperaturas de la fuente térmica deben estar entre 150 y 180°C (ica, 2012)

Al contar con mayores temperaturas destinadas a separar los fluidos dentro del ciclo, la solución a la salida del generador puede estar más concentrada dado que la cantidad de refrigerante separado del absorbedor depende de la temperatura suministrada. El calor rechazado en este generador es suficiente para regenerar en otra etapa una solución de los fluidos, así la fuente energética es usada dos veces en el mismo ciclo Figura 3.3. Los enfriadores por absorción de doble etapa están disponibles para capacidades relativamente altas a partir de los 170 KW (Núñez, 2010).

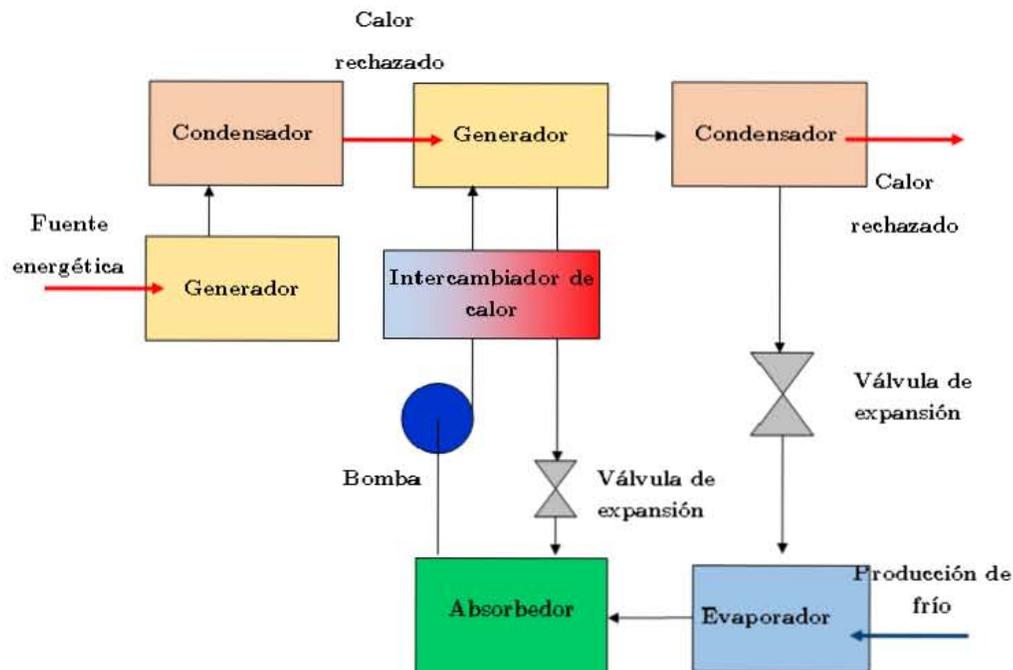


Figura 3.3 Ciclo de refrigeración por absorción de doble efecto

*Figura 3.4 Costos de enfriador y equipo auxiliar para absorción y compresión (D. Rafferty)*

## **3.2 Ciclo de adsorción**

El ciclo de adsorción es conocido y estudiado en menor medida que el ciclo de absorción, sin embargo se estima como una tecnología con un gran potencial.

Este ciclo es también de tipo cerrado y es muy similar al de absorción, la principal diferencia es que el medio de sorción es un sólido en lugar de un líquido y la principal consecuencia que esto conlleva es que no se puede elevar la presión mediante una bomba. El adsorbente es un material extremadamente poroso, los adsorbente más empleados tienen una superficie interna de varios cientos de centímetros cuadrados por gramo de material. Los adsorbentes deben de tener una gran afinidad al refrigerante, deben tener gran capacidad de cambiar la carga adsorbida con la variación de su temperatura y deben tener excelente compatibilidad con el refrigerante. Igualmente la reacción de sorción es exotérmica. Así como en el ciclo de absorción existen pares de materiales muy empleados y muy estudiados. Los que se utilizan típicamente son: el gel sílice-agua y zeolita-agua. Algunos menos empleados son carbón activado-amoniaco y carbón activado-metanol. (Al-Alili, Hwang, & Radermacher, 2013) La adsorción puede ser dividida en adsorción física y adsorción química dependiendo del principio que une al refrigerante con el adsorbente: fuerzas de Van Der Walls o enlaces covalentes, respectivamente.

El ciclo de adsorción está conformado por un evaporador y un condensador funcionando típicamente y dos cámaras donde el adsorbente interactúan con el refrigerante Figura 3.5.

El funcionamiento del ciclo de adsorción sigue los mismos principios de condensar, expandir y evaporar el refrigerante de los ciclos de refrigeración convencionales, sin embargo el compresor térmico (donde se encuentran las dos cámaras) trabaja de manera diferente. El funcionamiento puede dividirse en cuatro periodos:

## *Refrigeración térmica*

- Calentamiento y presurización isostérica<sup>5</sup>:

Durante este periodo, a carga máxima, una de las cámaras recibe calor de la fuente térmica mientras está cerrada. Esto provoca que la temperatura del adsorbente aumente y el refrigerante se vaporice. Al mantener cerrada la cámara, la presión del refrigerante incrementa desde la presión de evaporación hasta la presión de condensación. Este periodo es equivalente a la compresión.

- Calentamiento y desorción :

Durante este periodo, el adsorbente continua recibiendo calor mientras se conecta al condensador. La temperatura del adsorbente aumenta hasta el punto de desorber el refrigerante, dirigiéndose hacia el condensador, donde se condensa liberando calor al ambiente. El adsorbente alcanza la carga mínima.

- Enfriamiento y despresurización isostérica:

Durante este periodo, la cámara restante es enfriada mientras está cerrada. La temperatura del adsorbente y la presión del refrigerante remanente disminuyen para alcanzar las condiciones iniciales de adsorción. La carga permanece al nivel mínimo.

- Enfriamiento y adsorción:

Durante este periodo, el adsorbente es enfriado continuamente mientras es conectado al evaporador. Conforme la temperatura desciende, el adsorbente adsorbe el refrigerante en forma de vapor proveniente del evaporador.

(Núñez, 2010), (Hua, Zhang, Liu, & Wu, 2012) & (Al-Alili, Hwang, & Radermacher, 2013)

---

<sup>5</sup> Los procesos isostéricos son aquellos donde la carga o cantidad de la sustancia en un adsorbente se mantiene constante.

Este sistema tiene temperaturas de activación desde los 50 °C (Wang & Vineyard, 2011)

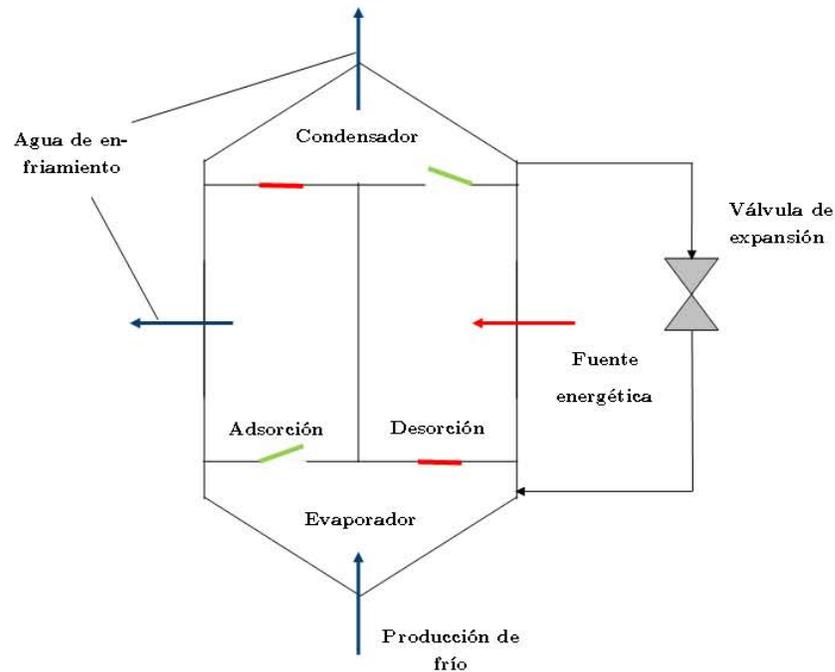


Figura 3.5 Ciclo de refrigeración por adsorción

El COP de un sistema como este a temperaturas de entre 75° a 95°C en la activación del sistema está comprendido entre 0.35 a 0.6 (Wang & Vineyard, 2011).

### 3.3 Ciclo de sólido y líquido desecante

Estos ciclos pertenecen a los ciclos abiertos, es decir donde el refrigerante está expuesto al ambiente. El principio de funcionamiento está basado básicamente en deshumidificar el aire con un desecante sólido o líquido, enfriarlo en un intercambiador de calor y finalmente acondicionarlo a la temperatura deseada de confort mediante refrigeración evaporativa (Figura 3.6). El desecante, sea sólido o líquido es regenerado mediante la adición de calor, liberando así el vapor adsorbido. Para obtener una producción continua, en el caso del sólido se emplea una rueda giratoria que por un lado expone al aire el desecante sólido y por otro expone al mismo desecante, cargado de vapor, a la fuente térmica para liberar el vapor y poder ser expuesto al aire una vez más. En el caso del desecante líquido, una cama

de líquido llamada cama deshumidificante, es expuesta al aire, circulada hacia la cama de regeneración dónde se le aplica energía térmica y enviada de vuelta a la primera cama para deshumidificar otra vez (Kinsara, Elsayed, & Al-Rabghi, Proposed Energy-Efficient Air-Conditioning System Using Liquid Desiccant, 1995). Para mejorar el desempeño del ciclo se emplea el aire de vuelta para precalentar la corriente de aire inicial.

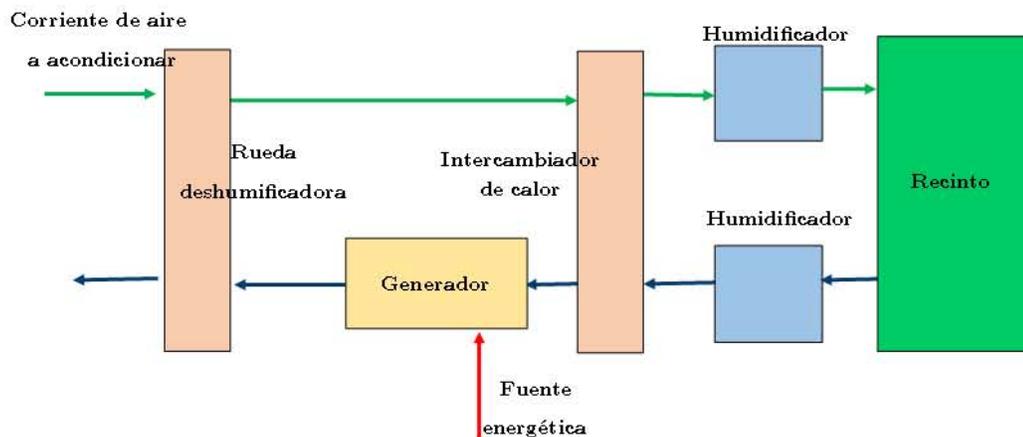


Figura 3.6 Ciclo con desecante

El proceso de desecar está basado en la transferencia de humedad debido a una diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie del desecante (presión menor) y la del aire de los alrededores (presión mayor), así el proceso de desecar ocurre cuando la humedad del aire entra en contacto con el desecante hasta que ambas presiones se igualen (Kinsara, Elsayed, & Al-Rabghi, Proposed Energy-Efficient Air-Conditioning System Using Liquid Desiccant, 1995). Entre los desecantes más comunes se encuentran: el gel sílice, zeolitas, zeolitas sintéticas, carbón, alúminas activadas, y polímeros sintéticos para sólidos y Cloruro de litio, Cloruro de Calcio y Bromuro de Litio en líquidos (Lazzarin, Gasparella, & Longo, 1998).

### 3.4 Ciclo por eyector

La refrigeración por eyector se puede catalogar como una tecnología termomecánica para producir frío. Ha sido utilizada para aplicaciones de enfriamiento desde hace muchos

años. En el estado actual de desarrollo, el sistema cuenta con COP mucho más bajos que en los sistemas de compresión. Actualmente no es un ciclo muy solicitado y sus aplicaciones son algo escasas, pero que va en constante aumento, dada su simplicidad constructiva, ausencia de partes móviles, operación a bajas temperaturas y bajo costo operacional (Vidal & Colle, 2009).

El sistema fue desarrollado por Maurice Leblanc en 1910, actualmente el desarrollo e investigación en el ciclo continua. Se han desarrollado sistemas con capacidades de refrigeración de hasta 60,000 kW, sin embargo el COP de un sistema de este tipo como se ha mencionado es aun relativamente bajo, de alrededor de 0.2 (Tassou, J.S., Ge, Hadaway, & Chaer, 2009). En cuanto a las temperaturas que puede alcanzar este ciclo, el rango está determinado por el refrigerante empleado, a diferencia de los ciclos de sorción, este sistema puede emplear prácticamente cualquier refrigerante convencional.

El sistema consiste en dos circuitos, el circuito de potencia o energético y el circuito de refrigeración Figura 3.7. En el circuito de potencia (sección superior), energía térmica es suministrada en un generador para evaporar el refrigerante líquido a alta presión. El vapor generado, conocido como fluido primario, se expande a través de la tobera del eyector acelerándose hasta una velocidad supersónica hacia una cámara de baja presión o incluso vacío permitiendo la entrada del refrigerante en forma de vapor proveniente del evaporador conocido como fluido secundario. Los dos fluidos se mezclan antes de entrar a la tobera divergente del eyector donde la combinación de ambos flujos alcanza presión de saturación a la temperatura de condensación. El fluido posteriormente, es dirigido hacia el condensador rechazando calor al ambiente. Al salir del condensador, una porción del fluido es bombeado nuevamente al generador para completar el ciclo en el circuito de potencia., mientras que la porción de fluido restante es expandido en una válvula de estrangulación para continuar su trayecto en el evaporador como mezcla liquido-vapor. Así el refrigerante se evapora al producir el efecto de refrigeración en el evaporador y el vapor producido es entonces dirigido

a la cámara de mezclado del eyector, conformando así el circuito de refrigeración. (Hua, Zhang, Liu, & Wu, 2012)

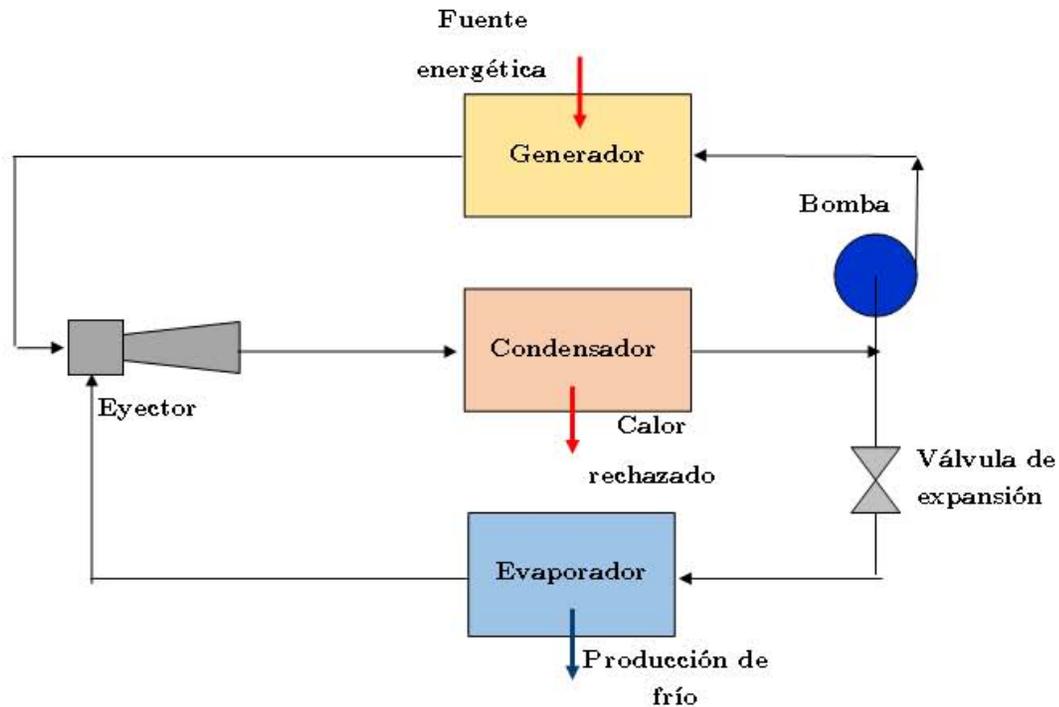


Figura 3.7 Ciclo de refrigeración por eyector

El eyector (Figura 3.8) está conformado de dos partes: una tobera de Laval donde el fluido se acelera hasta alcanzar una velocidad supersónica, creando un vacío parcial para admitir el fluido secundario, y un difusor que de igual manera es una tobera convergente-divergente, que dadas las condiciones de velocidad, el fluido desacelera en ambas partes de la tobera recuperando presión.

Los fluidos compresibles donde el número de Mach es mayor a 0.3, en un arreglo de toberas como el eyector son modelados mediante el desarrollo de cuatro ecuaciones principales: La ecuación de continuidad, la ecuación de conservación de momentum lineal, la ecuación de balance de energía y la ecuación de estado.

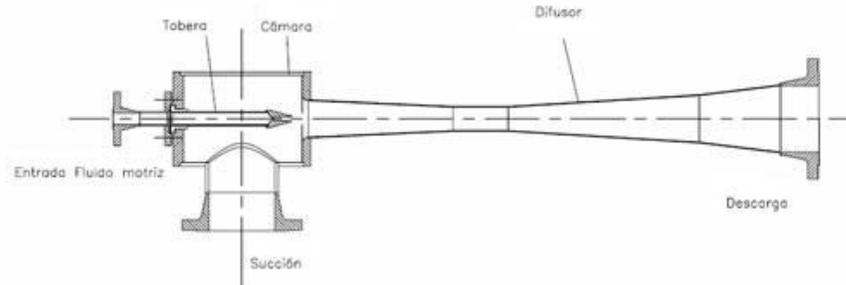


Figura 3.8 Eyector<sup>6</sup>

En la garganta de la tobera de laval (parte izquierda del eyector Figura 3.8) se deben dar las condiciones críticas del fluido que se distinguen con un superíndice \* para alcanzar un Mach de 1.

$$P^* = P_0 \left( \frac{2}{\gamma_2 - 1} \right)^{\frac{\gamma_2}{\gamma_2 - 1}} \quad \text{Ec.3.11}$$

$$T^* = T_0 \left( \frac{2}{\gamma_2 - 1} \right) \quad \text{Ec.3.12}$$

$$\rho^* = \rho_0 \left( \frac{2}{\gamma_2 - 1} \right)^{\frac{1}{\gamma_2 - 1}} \quad \text{Ec.3.13}$$

En el cálculo de flujos compresibles es necesario emplear las condiciones de estancamiento como punto de referencia, que tienen como subíndice un cero. Esta propiedad es equivalente al estado que alcanzaría un fluido al frenarse mediante un proceso sin roce y adiabático hasta el reposo. (Gherardelli)

$$P_0 = P \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad \text{Ec.3.14}$$

$$T_0 = T \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \quad \text{Ec.3.15}$$

<sup>6</sup> Imagen tomada de [http://www.inmateinsa.com/sistemas\\_vacio.html](http://www.inmateinsa.com/sistemas_vacio.html)

$$\rho_0 = \rho \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \quad \text{Ec.3.16}$$

Dónde:

*M*: Número de Mach

*ρ*: Densidad del fluido

*γ*: Relación entre calores específicos:  $C_p/C_v$

*T*: Temperatura del fluido

Con estas propiedades, según el número de mach deseado se puede diseñar el eyector para diferentes presiones deseadas a la salida del mismo.

## 3.5 Comparación entre las tecnologías de refrigeración térmica.

Las siguientes tecnologías que ya se han descrito anteriormente presentan diferentes ventajas y desventajas respecto al resto y sobre todo frente al ciclo de refrigeración por compresión, es por ello que es necesario compararlas presentando primeramente las ventajas y desventajas de cada una.

### 3.5.1 Ciclo de absorción

#### Ventajas

- Es el ciclo de sorción más estudiado y desarrollado.
- Como ciclo cerrado, el refrigerante no está en contacto con el medio a enfriar.
- El mayor impacto sobre el COP y la capacidad térmica recae en la temperatura de entrada del recurso térmico. Donde para temperaturas de pozos de media entalpía se tienen temperaturas relativamente altas
- El único componente móvil es la bomba.
- No es ruidoso y no genera vibraciones.

- Mayor disponibilidad en el mercado que cualquier otra tecnología de refrigeración térmica
- El mantenimiento es menor dado la ausencia de partes móviles.
- Tiene un COP relativamente alto para las tecnologías de refrigeración térmica de entre 0.5 y 0.9

## Desventajas

- De acuerdo a la los refrigeradores por absorción operando entre 80 y 115°C pueden tener un sobredimensionamiento de entre el 20% y 400% (D. Rafferty).
- Se puede dar un incremento en el costo inicial debido a la torre de enfriamiento que debe ser más grande como resultado de un bajo COP. Para ilustrar esto, supongamos un equipo de absorción con un COP de 0.7 y un equipo de compresión que a las mismas condiciones puede tener un COP de 3. Por cada unidad de refrigeración el ciclo por compresión tiene que rechazar 0.33 unidades de calor mientras que para la misma unidad de refrigeración el equipo de absorción deberá rechazar 1.42 unidades de calor; dando significado a estos datos, y considerando que el rechazo de calor es parte fundamental del ciclo, la torre de enfriamiento del equipo de absorción tiene que cubrir ese excedente de calor rechazado (D. Rafferty).
- Presenta corrosión en temperaturas mayores a 200°C en la fuente energética.
- Vibraciones en el sistema pueden causar problemas con el absorbente líquido, por ejemplo que este fluya del absorbedor al condensador o del generador al evaporador, contaminando al refrigerante. Es decir su utilización está restringida en espacios con movimiento como el transporte.
- Puede presentarse cristalización en el fluido absorbente para el caso de BrLi

### **3.5.2 Ciclo de adsorción**

#### Ventajas

- Bajas temperaturas en la fuente térmica.
- No involucra ninguna parte móvil haciéndolo más duradero.
- Bajos costos de operación.
- Cero ODP (que por sus siglas en inglés significan potencial de deterioro de la capa de ozono).
- Puede soportar temperaturas más altas que el ciclo de absorción sin aparecer corrosión. (Al-Alili, Hwang, & Radermacher, 2013)
- Funcionamiento inmune a vibraciones y puede operar en sistemas en movimiento<sup>7</sup>.
- No hay cristalización y menos corrosión

(Al-Alili, Hwang, & Radermacher, 2013)

#### Desventajas

- Produce refrigeración de manera intermitente.
- COP relativamente bajo. Para enfriamiento de agua usando silica Gel-Agua como par de trabajo, se tienen COP de entre 0.3 a 0.6 (Wang & Vineyard, 2011).

### **3.5.3 Ciclo de sólido desecante**

#### Ventajas

- Puede contener mucha más humedad del aire que el de líquido desecante

---

<sup>7</sup> Como ejemplo está el desarrollo de un prototipo para aire acondicionado en camiones (ClimateWell, 2016)

- Los desecantes sólidos tienen mayor capacidad de expulsar la humedad en la regeneración que los líquidos.
- Diseño con pocas partes móviles.
- No tiene problemas de escarcha dado que no alcanzan temperaturas muy bajas.

### Desventajas

- Las aplicaciones se reducen prácticamente a aire acondicionado.
- Se requiere un mantenimiento constante en la rueda, quien atrapa muchas sustancias perjudiciales.

(Mateo Sánchez & Santana Santana)

### **3.5.4 Ciclo de líquido desecante**

#### Ventajas:

- Mayor facilidad de manipulación respecto a los de sólido desecante.
- Poca caída de presión del aire al hacerse pasar por el desecante.
- Se puede utilizar un método de filtración para remover partículas en el aire.
- Bajas temperaturas de regeneración.

(Kinsara, Elsayed, & Al-Rabghi, Proposed Energy-Efficient Air-Conditioning System Using Liquid Desiccant, 1995)

#### Desventajas:

- Las aplicaciones se reducen prácticamente a aire acondicionado.
- Riesgo de contaminación del aire con la solución.
- Tecnología nueva en México.

### **3.5.5 Ciclo por eyector**

#### Ventajas:

- Tecnología apta en lugares con calor residual.
- El mantenimiento es menor dado la ausencia de partes móviles.
- Sólo emplea un fluido de trabajo, lo que facilita su mantenimiento y reduce costos de operación en el equipo.
- Operación mucho más sencilla.
- Desde un punto de vista ambiental, el ciclo puede considerarse perfectamente sellado, la única parte móvil es la bomba.

#### Desventajas:

- COP relativamente bajo de entre 0.2 y 0.3.
- Indisponibilidad general en la industria comercial lo que no facilita la selección de este equipo para aplicaciones particulares y la falta de datos de operación no provee confianza para la aplicación de la tecnología.
- Alto costo en la torre de enfriamiento.
- La mayor limitante se encuentra en el uso del eyector, su diseño prácticamente determina el diseño del resto del ciclo.

Una consideración importante para determinar el uso de estas tecnologías es que en los equipos comerciales, los ciclos cerrados que son el de absorción, adsorción y por eyector producen agua helada para abastecer cualquier equipo de aire acondicionado, mientras que en los de ciclo abierto que son el de líquido y sólido desecante producen aire acondicionado directamente.

# Capítulo 4

## Comparación de ciclos de refrigeración térmicos

### **4.1 Ubicación del sistema.**

En el capítulo 1 se trató la información concerniente a la geotermia, su aplicación, el modo de explotación y su origen. El presente trabajo está pensado en primera instancia ser un antecedente para la implementación de un sistema de refrigeración con geotermia en México.

Como ya se ha hecho mención, la geotermia es un recurso que por naturaleza no está disponible inmediatamente al humano, como la solar, por ejemplo; sino que es necesaria una exploración para encontrar el recurso y que sea además una fuente productiva. La exploración geotérmica es una inversión muy riesgosa, es decir que los métodos actuales no garantizan éxito para encontrar la fuente geotérmica y de encontrarse tampoco hay garantía de que se trate de un pozo productivo, esto sumado a los elevados costos del equipo de operación que generalmente tienen que rentarse por tiempo y a la cantidad de personal requerido para operar el proyecto vuelven a la inversión bastante insegura, no obstante el lado más atractivo de tal inversión es que en caso de encontrar un recurso geotérmico productor, prácticamente se encontraría un recurso ilimitado, no intermitente y con la capacidad de altos factores de planta.

Es por ello que para que el proyecto sea viable y rentable es necesario fijar la atención en pozos geotérmicos productores, activos actualmente y con las condiciones necesarias para suministrar la energía requerida en un ciclo de refrigeración térmico. En México los yacimientos geotérmicos de alta entalpía son destinados principalmente a la generación de

potencia eléctrica, por esta razón estos no tendrían presencia para alimentar un ciclo de refrigeración. Así, las únicas posibilidades disponibles son los recursos de baja y hasta media entalpía, descartando los de muy baja entalpía por las bajas temperaturas que alcanzan. Restringiendo en principio el alcance a México, centramos la atención en pozos explorados de baja y media entalpía presentes en México. La Tabla 4.3 exhibe justamente los recursos de media y baja entalpía en México, con temperaturas superiores a 70°C lo que los convierte en lugares aptos para implementar el sistema de refrigeración.

Dentro de los ciclos de refrigeración térmica mencionados en el Capítulo 3 *Tecnologías de refrigeración a través de energía térmica*, Se analizarán como opciones potenciales para determinadas aplicaciones de refrigeración al ciclo de absorción y al ciclo por eyector por ser las que tiene más aplicaciones y por abarcar con ellas un ciclo de sorción y uno termomecánico. Es imperativo el cálculo de coeficientes de operación, capacidades de refrigeración y la simulación de su funcionamiento, para completar el análisis de estas dos opciones.

## **4.2 Simulaciones**

Las diferentes posibilidades para cada pozo geotérmico particular, para cada aplicación específica de refrigeración y para cada tipo de los ciclos de refrigeración mencionados, obligan a formular varios resultados al variar los datos particulares de cada situación, de manera que buscando practicidad, se pretende simular los ciclos y generar diferentes resultados automatizados a partir de un modelo particular, obteniendo así la mejor opción en cuanto a parámetros de operación de los ciclos. En este caso se obtendrán simulaciones para el pozo de la Caldera en Guanajuato Tabla 1.30. Para el ciclo de absorción y eyector se elige a ASPEN Plus como software para simulación, un software muy utilizado en la industria química y con los criterios bien fundamentados conlleva a resultados validados con modelos experimentales.

ASPEN plus utiliza los principios de la Ingeniería química para sus cometidos que toma como base conceptos de Termodinámica, cinética química, operaciones unitarias, para el desarrollo del balance de materia y energía así como el análisis y la optimización de procesos, comportamiento dinámico y diseño de equipos, soluciona los modelos a partir de la filosofía modular secuencial por ecuaciones.

Para ambos ciclos se fija como parámetro  $5^{\circ}\text{C}$  en la temperatura de refrigeración. Esta temperatura está bien establecida en el rango de aplicaciones de procesos industriales y refrigeración de alimentos, así como aire acondicionado Figura 2.1.

### **4.2.1 Absorción**

Para poder aproximar los datos de manera teórica se recurre al software ASPEN Plus que facilita el modelado del ciclo por absorción a fin de encontrar el mejor rendimiento variando las propiedades que definen el funcionamiento del ciclo. El modelo de la simulación del ciclo en este software se puede observar en la Figura 4.1

El modelo a simular será el ciclo por absorción de simple efecto, dadas las temperaturas en el pozo este es más adecuado que el de doble efecto donde se requiere mayor temperatura. El ciclo cuenta con recuperador de calor entre la mezcla rica y pobre en absorbente, para mejorar su desempeño.

El par de fluido de trabajo a emplear será agua-bromuro de litio, dónde el agua actúa como refrigerante. Se elige este par por presentar mejor desempeño, y principalmente porque para emplear el par agua-amoniaco, segundo par muy estudiado que ofrece la ventaja de enfriar por debajo de los  $0^{\circ}\text{C}$ , se requerirían fuentes de calor por arriba de los  $110^{\circ}\text{C}$ , niveles que no ofrecen los pozos considerados (Rafferty).

Por la naturaleza del proceso y el tipo de fluido manejado, se elige como método de resolución el ELECNRTL para las sales generadas del BrLi y el método STEAMNBS para el agua.

Una vez elegidas las sustancias y métodos de resolución participantes en la simulación, se procede a definir los siguientes parámetros en el modelo.

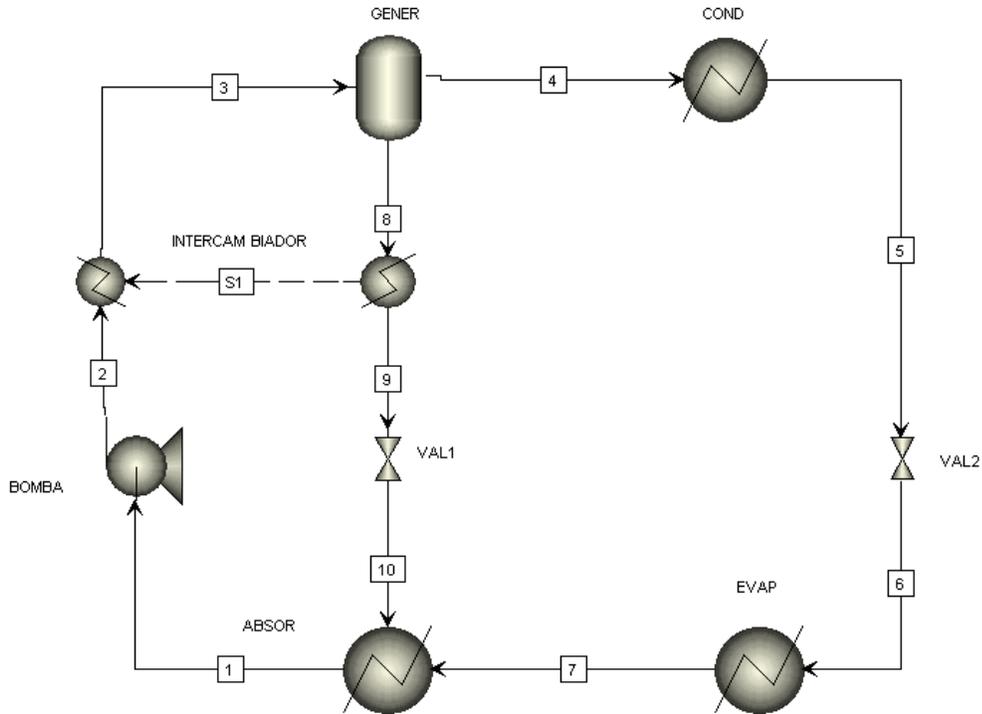


Figura 4.1 Modelo de ciclo de absorción en ASPEN Plus

#### Definición de los parámetros de entrada:

De acuerdo a los intercambiadores de calor empleados para usos directos de la geotermia (Lienau & Lunis, 1991), se asume un acercamiento entre el fluido geotérmico y el fluido de trabajo del ciclo de 1.5 °C.

Para determinar las propiedades del refrigerante a continuación del generador, se emplea como base de datos REFPROP<sup>8</sup>. Obteniendo con la temperatura de salida del intercambiador, la presión de saturación.

<sup>8</sup> Base de datos desarrollada por el Instituto nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos para propiedades termodinámicas de diferentes sustancias

El absorbedor queda determinado por tener a la salida líquido saturado, liberando calor de la reacción exotérmica entre el absorbente y el absorbedor al ambiente de la región geotérmica (Punto 1 en la Figura 4.1).

La bomba eleva la presión de la mezcla hasta la presión de saturación para la temperatura ambiental de la región geotérmica (Punto2).

El intercambiador de calor (S1 en la Figura 4.1) entre la mezcla rica y pobre de absorbedor se asume con una eficiencia del 0.7, valor común para estos intercambiadores (Llopis, Cabello, Sánchez, & E., 2010), determinando la potencia real transferida al flujo de solución rica en absorbente y con ella calculando la temperatura de salida en el intercambiador por medio de un bloque de cálculo en ASPEN, ingresando en código FORTRAN la expresión que define a la eficiencia del intercambiador según el caudal con la capacidad calorífica menor. En ambos caudales tanto el rico en refrigerante como en el pobre en refrigerante se tienen capacidades caloríficas similares, sin embargo al ser menor el caudal del flujo concentrado en absorbente, resultado del desprendimiento de refrigerante, se tiene en él menor capacidad calorífica.

El generador actuará según la temperatura de la fuente geotérmica, como se hizo mención anteriormente, la cantidad de refrigerante desorbido de la corriente está en función de la temperatura en el generador.

Las dos válvulas de estrangulamiento en el circuito de potencia se determinan por la presión de saturación del refrigerante a la temperatura de refrigeración.

El condensador queda determinado con una salida de líquido saturado a la presión de saturación para las condiciones ambientales de la zona geotérmica

El evaporador se determina con una salida de vapor seco para la presión de saturación a la temperatura de refrigeración.

Las características del flujo en el ciclo de absorción, específicamente la concentración de la sal Bromuro de Litio en el punto 1 del ciclo se determina de acuerdo a las condiciones de esta mezcla en saturación para la temperatura del absorbedor, la cual se establece como la temperatura ambiente ya que dicho dispositivo cede el calor al medio ambiente. Las condiciones de saturación se obtienen del diagrama P-T-X para soluciones acuosas de Bromuro de Litio. En este caso para la temperatura y presión de saturación, tenemos una concentración del 44% en la sal Br-Li

**Consideraciones asumidas en la simulación:**

- No hay caída de presión en ninguno de los intercambiadores de calor.
- La bomba es isentrópica.
- La temperatura de condensación es la misma que la temperatura de salida del absorbedor.
- La temperatura, presión y concentración es homogénea dentro de cada dispositivo.
- Los equipos son adiabáticos, es decir que no es considerada la transferencia de calor desde el ciclo hacia los alrededores (exceptuando los intercambiadores de calor).
- El ciclo opera en estado estacionario.

Como ya se ha hecho mención, la temperatura en el generador es un parámetro que actúa directamente en el COP del ciclo, alcanzando siempre un punto asintótico en el cual un aumento de temperatura no significaría un aumento significativo en el rendimiento del ciclo, lo cual es importante para su optimización. A fin de evaluar la factibilidad de añadir un intercambiador de calor entre las mezclas pobre y rica en refrigerante, dadas las temperaturas particulares de pozo, se procede con una primera simulación con intercambiador de calor, resultando con las consideraciones ya mencionadas un COP de 0.93 y se procede adicionalmente con una simulación sin el intercambiador de calor resultando en un COP de 0.92. Ambos valores están dentro del rango para los enfriadores por absorción en la industria.

Como puede notarse el aumento es prácticamente intrascendente en el rendimiento del ciclo, sin embargo se continuará determinando los parámetros y detalles de ambas configuraciones para tener más información al respecto sobre el desempeño del ciclo con las condiciones particulares de la zona geotérmica. Es importante resaltar, que a pesar del poco aumento en el COP, el ciclo sin intercambiador de calor, presenta una temperatura menor en el absorbedor al ciclo con intercambiador.

A continuación se hace variar la cantidad de flujo total en el ciclo, obteniendo con ello diferentes capacidades de refrigeración y con ello diferentes potencias térmicas necesarias en la fuente geotérmica. Figura 4.2

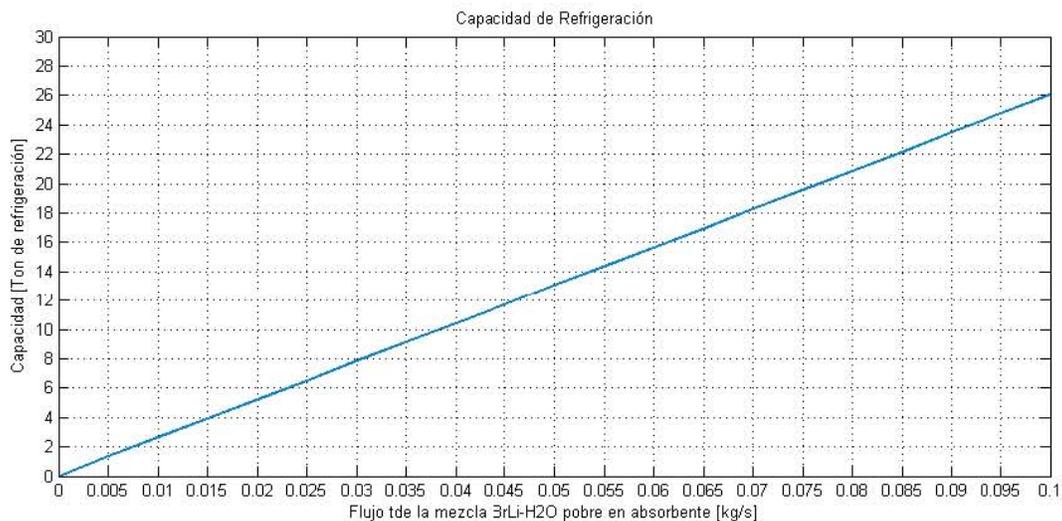


Figura 4.2 Capacidad de refrigeración generada para diferentes caudales de mezcla dentro del ciclo

En la Figura 4.2 se observa la producción de refrigeración para ambos ciclos, resulta en la misma línea dado que la capacidad de refrigeración depende del flujo de refrigerante en el circuito de refrigeración, como la cantidad de refrigerante desprendido del absorbedor depende de la temperatura geotérmica, no importa si este líquido viene precalentado antes del desorbedor, es decir que siempre alcanzará la misma temperatura, resultando en el mismo flujo de refrigerante para ambos casos.

## Refrigeración térmica

La energía requerida para lograr los diferentes niveles de capacidad de refrigeración también varía. Esta energía que es meramente obtenida del pozo geotérmico, se puede entender con el flujo másico de recurso geotérmico necesario para tal efecto, considerando temperatura constante del fluido geotérmico.

Para estimar la cantidad necesaria de fluido geotérmico, se considera un intercambiador de calor de placas con un Número de Transferencia de Unidades de 3.1 (Lienau & Lunis, 1991), calculando con este dato una temperatura de salida del fluido geotérmico del intercambiador de 25°C según las temperaturas obtenidas en la simulación antes y después del proceso de desorción. Con temperaturas de entrada y salida del recurso geotérmico, se encuentran las entalpías correspondientes y con la energía requerida para cada capacidad de refrigeración obtenida de la simulación en ASPEN se puede estimar el flujo másico necesario en el pozo.

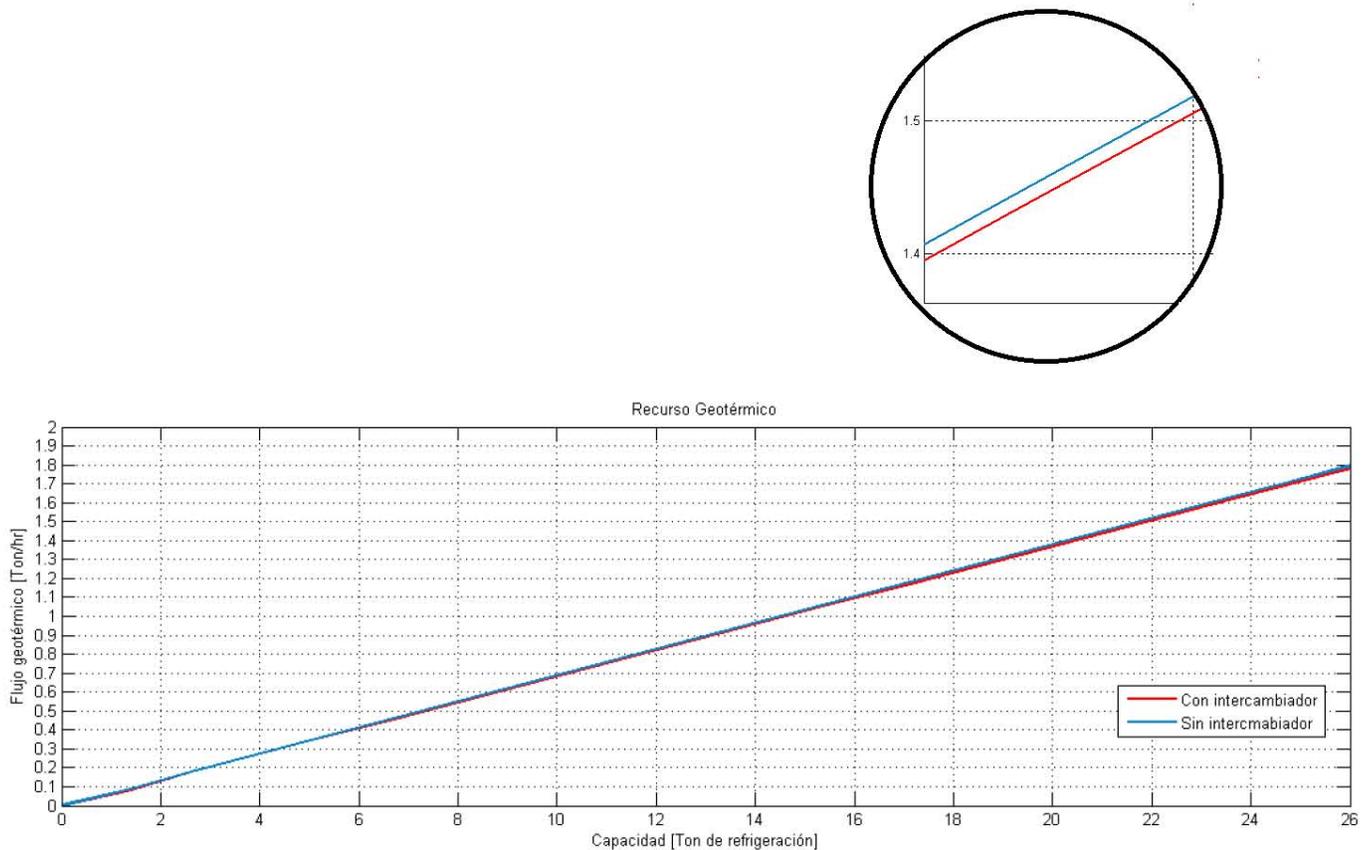


Figura 4.3 Recurso geotérmico necesario para diferentes producciones de refrigeración

Con un ciclo de refrigeración como este, se requerirían las cantidades de flujo másico de fluido geotérmico mostradas en la Figura 4.3 para las diferentes capacidades de refrigeración. Es evidente que la cantidad de flujo geotérmico requerido en ambas configuraciones prácticamente no difiere si se utiliza o no un intercambiador de calor entre las mezclas de absorbente, esto es debido principalmente a la temperatura de pozo que es relativamente alta, así mismo es importante notar que para capacidades más grandes, es decir, en refrigeradores con mayor producción de frío las líneas tienden a separarse más. En el intercambiador de calor apenas hay una recuperación despreciable para la cantidad de energía suministrada por la fuente geotérmica, si se manejan temperaturas por debajo de los 70° C la desorción es menor y el caudal rico en absorbente es mayor, pudiendo ceder más energía a la corriente pobre en absorbente.

Cabe destacar que el COP considerando la potencia consumida en la bomba difiere en un 0.0002% para el ciclo con intercambiador y en un 0.0003% para el ciclo sin intercambiador con el COP sin considerar bomba, lo que hace a la energía de la bomba intrascendente en el rendimiento del ciclo. Todo esto bajo este modelo teórico

Con la Ec. 2.9 se obtiene el efecto refrigerante con la porción de agua en el ciclo correspondiente al flujo de refrigerante dentro de él y para todos los valores, resultado de la variación total de la mezcla BrLi-H<sub>2</sub>O, obtenemos un efecto refrigerante constante de 2424.891 [KJ/kg] para el ciclo con intercambiador y el mismo dato para el ciclo sin intercambiador. Dato que determina la capacidad del agua dentro de este ciclo para producir frío. Demostrando además que este efecto es resultado de la capacidad que tiene el agua como refrigerante en este ciclo, independiente de las configuraciones empleadas en él.

A continuación se hace variar la temperatura de refrigeración para conocer el comportamiento del ciclo a diferentes temperaturas. Rango que se establece desde 5°C hasta 15°C, donde las aplicaciones pueden llevarse a la implementación de aire acondicionado. La variación se realiza manteniendo un flujo másico total de mezcla BrLi-Agua de 0.005 Kg/s.

Esta variación es importante porque según la temperatura necesaria será el rendimiento y la capacidad de refrigeración.

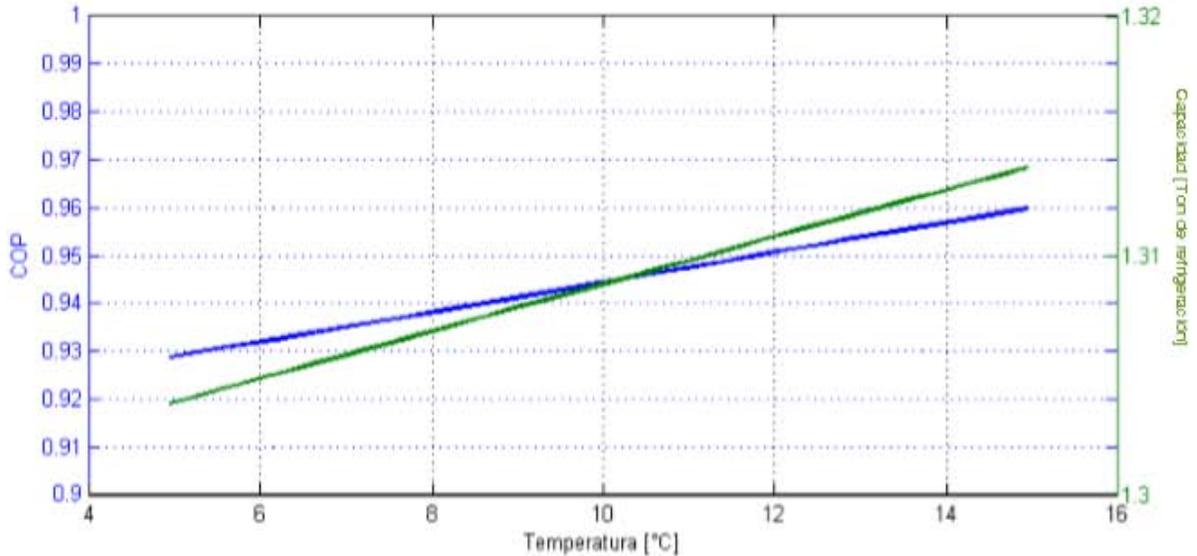


Figura 4.4 Comportamiento del ciclo variando la temperatura de refrigeración

En esta figura podemos notar un incremento tanto en el COP como en la capacidad de refrigeración a medida que aumenta la temperatura de refrigeración para un caudal constante en los fluidos absorbente y refrigerante. Si bien este incremento es del orden de centésimas, sí marca un mejor desempeño del ciclo y esto se debe a la proximidad entre temperatura de refrigeración y temperatura de sumidero, mientras estas sean más próximas el desempeño incrementa, situación notable según la Ec. 2.7.

En cuanto al incremento en la capacidad de refrigeración que de igual manera al caso anterior, del orden de centésimas, se debe a la cantidad de calor disponible en forma de calor latente para vaporizar el refrigerante. Si bien el caudal de refrigerante que pasa por el evaporador es el mismo, no lo es el calor necesario para evaporar este. Si observamos la Figura 2.3 podemos ver que el punto 3, después de la expansión isentálpica, cae más cerca de la línea de vapor saturado conforme se alcanzan presiones más bajas a la salida de la válvula de estrangulamiento. Lo cual, sin embargo puede no ser de esta manera para otros

fluidos de trabajo cuyas campanas de saturación tienen en su línea de vapor saturado, formas isoentálpicas o secas a diferencia de una de tipo húmeda para el caso del agua.

Una vez obtenidos estos datos podemos relacionar la temperatura de refrigeración necesaria con la demanda de recurso geotérmico a través de la Figura 4.5 y de esta manera establecer la relación directa entre aplicación de refrigeración deseada con las características del pozo requeridas.

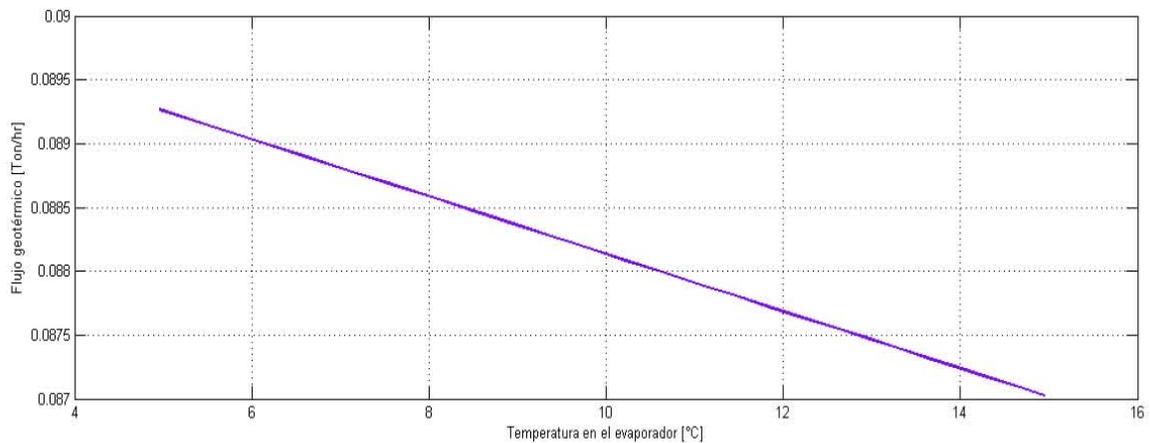


Figura 4.5 Requerimientos de flujo geotérmico para diferentes temperaturas de refrigeración

La gráfica de la Figura 4.5 muestra un descenso en el requerimiento geotérmico del orden de milésimas de tonelada por hora, es decir, de kilogramos de flujo geotérmico por cada hora. Para las dimensiones de un pozo geotérmico, tal variación es insignificante. Esta observación hace evidente que para que un ciclo de absorción alcance diferentes temperaturas al refrigerar es necesario ajustar el equipo que lo conforma y entonces diseñar cada dispositivo según los requerimientos, no necesitando hacer ajustes en el pozo geotérmico.

### 4.2.2 Ciclo por eyector

Este ciclo es igualmente simulado a través de ASPEN Plus. Se considera un ciclo empleando como fluido de trabajo al amoníaco por ser comercial en los enfriadores de este

tipo, por presentar potencial de agotamiento de ozono de cero (ODP), bajo potencial de calentamiento global (GWP), y alto calor latente de vaporización (Milazzo & Rochetti, 2015) lo que garantizaría seguridad al medio ambiente por un lado y por el otro, buen desempeño para absorber calor. Además el amoníaco ha demostrado el mejor rendimiento en ciclos de refrigeración por eyector (Wang, Shen, & Li, 2015), (Nehdi, Kairouani, & Elakhdar, 2008). Adicionalmente, el uso de un refrigerante como el amoníaco se evitan presiones subatmosféricas en el sistema. Por la naturaleza del proceso y el tipo de fluido manejado, se elige como método de resolución en ASPEN el PR-BM.

El diseño del ciclo modelado en ASPEN Plus se muestra en la Figura 4.6

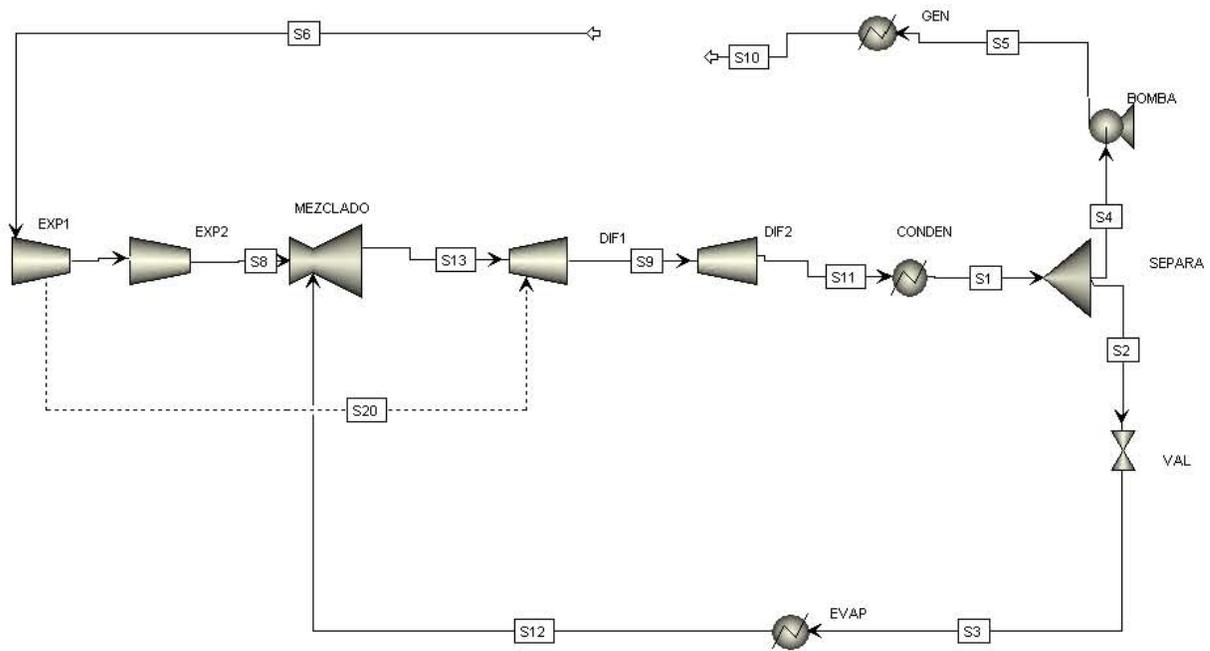


Figura 4.6 Modelo del ciclo por eyector en ASPEN Plus

Para este caso se busca variar la fracción de fluido en el separador que es dirigida al circuito de refrigeración, con el fin de encontrar la cantidad más conveniente a dividir, haciendo implícita la variación en el diseño del eyector y obteniendo así diferentes capacidades de refrigeración y coeficientes de operación.

Como paso inicial se fija una cantidad de 0.1 (Kg/s) como flujo de refrigerante para determinar los coeficientes de operación para las diferentes fracciones de amoníaco dirigidas al circuito de refrigeración.

### **Definición de los parámetros de entrada:**

De acuerdo a los intercambiadores de calor empleados para usos directos de la geotermia (Lienau & Lunis, 1991), se asume un acercamiento entre el fluido geotérmico y el fluido de trabajo del ciclo de 1.5 °C. Para determinar las propiedades del refrigerante a continuación del generador (dispositivo en contacto con el fluido geotérmico que vaporiza la sustancia), se emplea como base de datos auxiliar a REFPROP<sup>9</sup>. Obteniendo con la temperatura de salida del intercambiador, la presión de saturación.

La presión a la salida de la primera tobera del eyector es igual a la presión crítica alcanzando la velocidad sónica, obtenida mediante la Ec.3.11.

La segunda tobera del eyector tiene como entrada la energía necesaria a entregar para que al final del difusor se tenga la presión de condensación. Dato que se entrega de una primera solución en la simulación ya que se obligó a la tobera final del difusor a alcanzar la presión de saturación.

La primera tobera del difusor queda determinada, teniendo como entrada la energía que recupera de la primera tobera del eyector.

La presión en el condensador se determina mediante REFPROP para amoníaco a temperatura ambiente de la zona geotérmica como presión de saturación.

---

<sup>9</sup> Base de datos desarrollada por el Instituto nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos para propiedades termodinámicas de diferentes sustancias

## Refrigeración térmica

La caída de presión en la válvula de estrangulamiento se determina mediante REFPROP para amoníaco a temperatura de refrigeración de 5 °C como presión de saturación.

La bomba es determinada con la presión a alcanzar, misma que la de saturación para las condiciones del generador.

### Consideraciones asumidas en la simulación:

- El fluido de trabajo antes del eyector se considera con un mach de 0.2 antes de la aceleración en la tobera donde los efectos de la densidad son despreciables (White, 2009).
- Las propiedades de estancamiento son determinadas mediante la Ec.3.14 procedimiento sin roce y adiabático.
- No hay caídas de presión en ningún intercambiador de calor.
- Bomba isentrópica.
- El ciclo opera en un estado estacionario.

Después de una primera simulación, haciendo variar la fracción en el separador se obtienen los diferentes COP para los cuales se establece el número de Mach necesario antes del mezclador con la Ec.3.14; parámetro que indica en un principio la posibilidad de diseñar un eyector con tales características supersónicas.

Fracción hacia el refrigerador	Qevap KW	COP
0.1	13.3627569	0.10815928
0.2	30.066203	0.24335841
0.3	51.5420623	0.41718584
0.4	80.1765414	0.64895575
0.5	120.264812	0.97343362
0.6	180.397218	1.46015043
0.7	280.617895	2.27134512
0.8	481.059248	3.89373449

0.9	1081.93996	8.7609026
-----	------------	-----------

Tabla 4. 1 COP para diferentes variaciones de flujo en el circuito de refrigeración

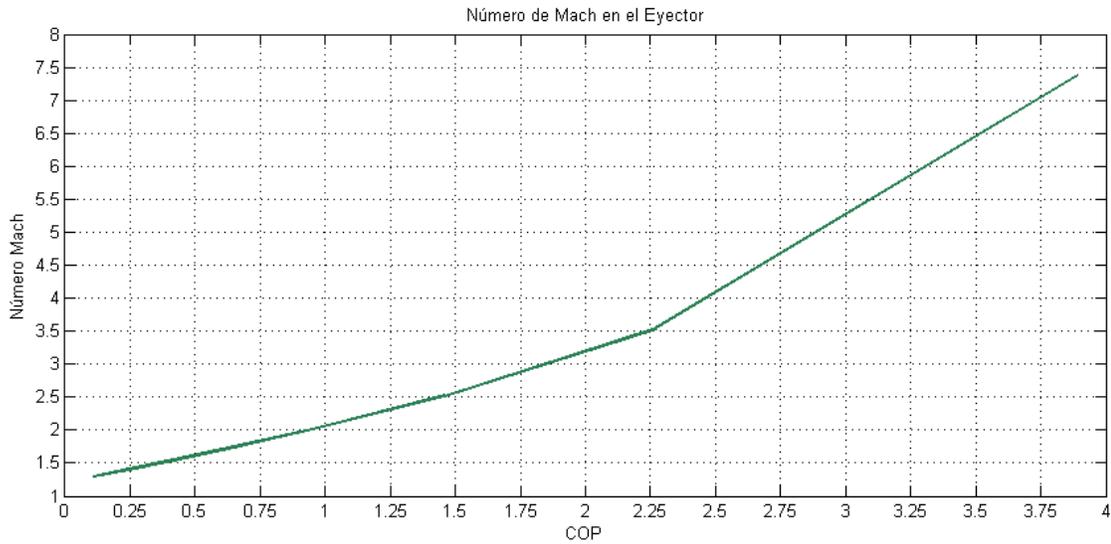


Figura 4.7 Variación del número de Mach en el eyector para el COP simulado

En la Figura 4.7 encontramos que teóricamente podrían obtenerse rendimientos en el ciclo mucho mayores a los comerciales, observamos también que el máximo COP para un Mach sin regiones subsónicas (White, 2009) es de aproximadamente 1.5, muy alto comparado con los que se encuentran en la industria. Sin embargo el diseño del eyector, parte clave del ciclo puede caer en un diseño irrealizable o muy costoso.

Se afina la tabla generando fracciones más pequeñas entre 0 y 0.2, dónde el número de Mach se mantiene por encima de la unidad sin sobrepasar a un valor que comprometa el diseño con ondas de choque y dónde el COP obtenido está dentro del rango comercial, encontrando con ello en qué punto de fracción del fluido la recuperación de presión en el difusor es suficiente para la presión de condensación necesaria.

Fracción	Potencia en la segunda tobera (W)	COP
0	0	0
0.01	2306.18947	0.00983266

0.02	2396.7476	0.01986599
0.03	2488.64811	0.03010619
0.04	2582.42147	0.04055973
0.05	2678.20619	0.05123335
0.06	2776.09032	0.06213406
0.07	2876.02966	0.0732692
0.08	2978.20979	0.0846464
0.09	3082.58786	0.09627365
0.1	3189.38283	0.10815929
0.11	3298.55275	0.12031202
0.12	3410.21654	0.13274095
0.13	3524.46365	0.1454556
0.135	3582.36265	0.15192317
0.14	3641.38417	0.15846594
0.15	3761.07264	0.1717824

Tabla 4. 2 Comparación de fracción de fluido de trabajo con la energía requerida por la segunda tobera y con el COP alcanzado

En la Tabla 4. 2 arrojada por la simulación en ASPEN observamos diferentes valores de potencia a recuperar en el difusor entregada por la segunda tobera en la primera parte del eyector. La simulación genera errores a partir de 3.6 KW ya que para entregar mayores potencias el fluido tendría que tener una caída de presión negativa, como eso no es posible la potencia a recuperar no alcanzaría a suministrar la necesaria para alcanzar la presión de condensación a la temperatura ambiente en la salida del eyector y no habría condensación del fluido.

Ya establecida la fracción con el mayor rendimiento (COP de 0.1519) podemos fijarla y hacer variar el flujo másico total en el ciclo de refrigeración para producir diferentes niveles de capacidad, sin comprometer a su vez el límite ya establecido de potencia entregada por la tobera, límite alcanzado en 0.1 Kg/s para la fracción ya fijada.

Cabe destacar que el COP considerando la potencia suministrada por la bomba en el funcionamiento del ciclo difiere en un 1.27% con el de 0.1519 considerado, que únicamente involucra la energía geotérmica suministrada en su cálculo

Para el caso, se genera un gráfica comparando el flujo másico total con la capacidad de refrigeración obtenida. Figura 4.8. Que es un indicio directo del tamaño del ciclo, por ser el caudal de refrigerante un factor de diseño en ellos.

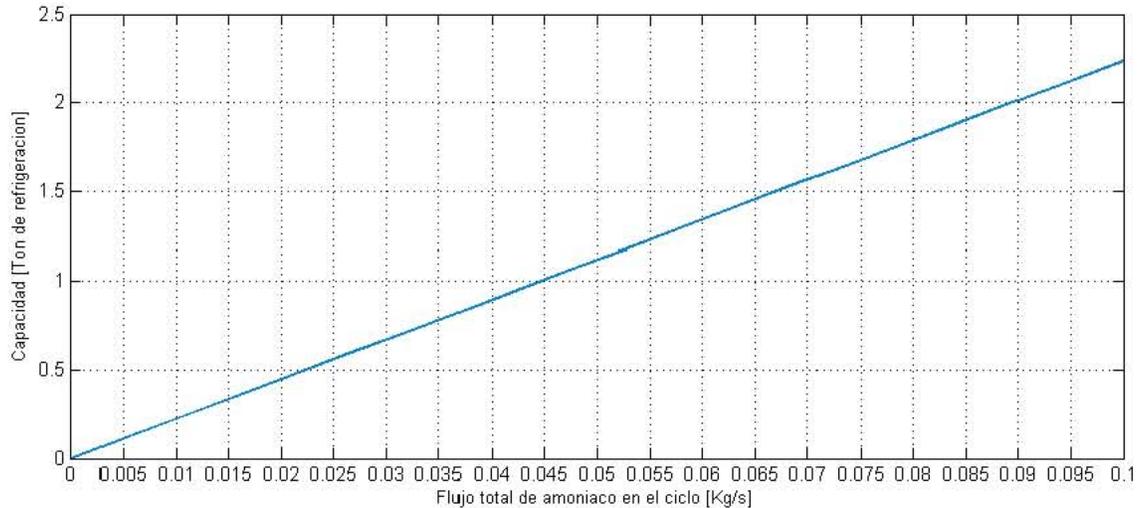


Figura 4.8 Producción de refrigeración variando el flujo de amoníaco total en el ciclo con un COP de 0.15

Sin embargo la energía requerida para lograr los diferentes niveles de capacidad de refrigeración también varía. Esta energía que es meramente obtenida del pozo geotérmico como ya se ha hecho notar en la desigualdad tan cercana entre COP's, se puede entender únicamente con el flujo másico de recurso geotérmico necesario para tal efecto.

Para estimar la cantidad necesaria de fluido geotérmico, se considera un intercambiador de calor de placas con un número de transferencia de unidades de 3.1 (Lienau & Lumis, 1991), estimando con ello una temperatura de salida del fluido geotérmico del intercambiador según las temperaturas de entrada y salida del amoníaco de 25°C. Con temperaturas de entrada y salida se encuentran las entalpías correspondientes y con la energía requerida para cada capacidad de refrigeración obtenida de la simulación en ASPEN se puede estimar el flujo másico necesario.

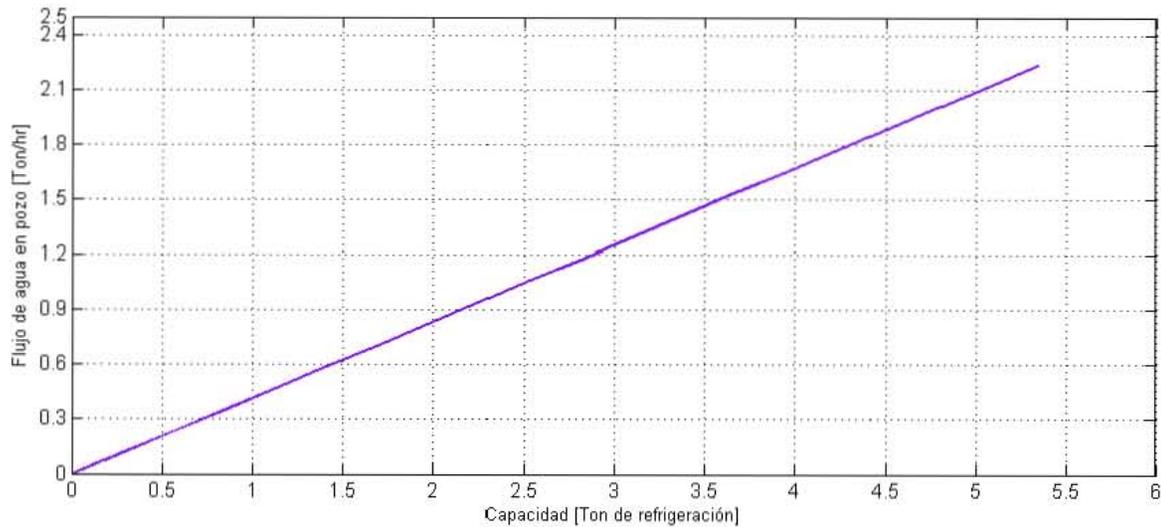


Figura 4.9 Flujo geotérmico requerido para las diferentes capacidades de refrigeración con COP de 0.15

La cantidad necesaria de flujo geotérmico sirve de referencia para determinar hasta qué punto, un pozo en particular puede abastecer la energía requerida al ciclo, que en este caso es La Caldera en Guanajuato.

Con la fig. 2.9 se obtiene el efecto refrigerante con el flujo total de amoníaco en el ciclo, obteniendo un valor constante de 187.7 [KJ/kg]. Dato que determina la capacidad del amoníaco dentro de este ciclo para producir frío. Demostrando además que este efecto es resultado de la capacidad que tiene el agua como refrigerante en este ciclo, independiente de las configuraciones empleadas en él.

Finalmente se hace variar la temperatura para determinar el comportamiento del ciclo a diferentes temperaturas, para lo cual se fija el flujo másico de refrigerante a 0.09 [Kg/s] de amoníaco.

La simulación arroja datos de variación en el COP y en la capacidad de refrigeración.

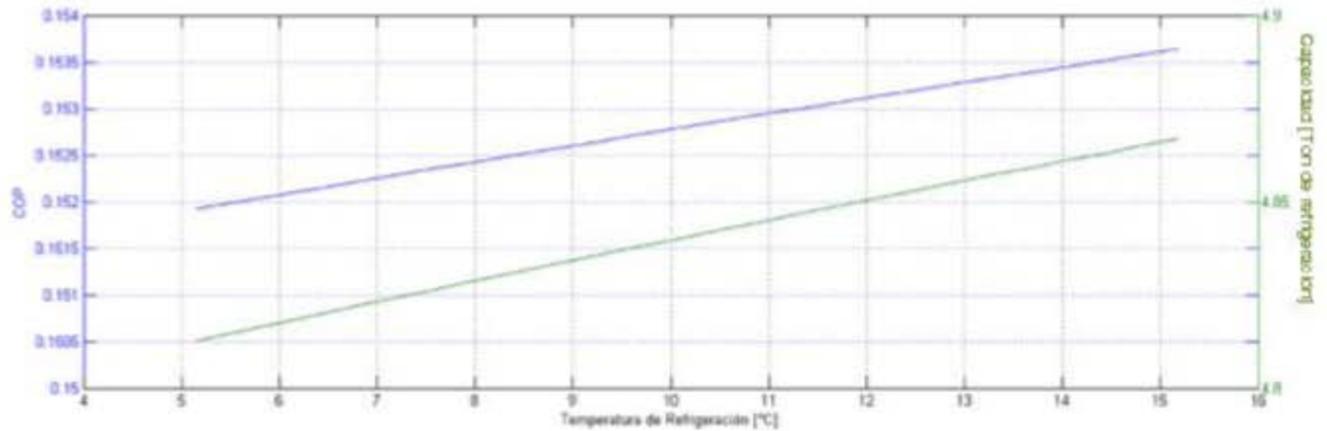


Figura 4.10 Comportamiento del ciclo variando la temperatura

Podemos observar que el COP permanece prácticamente invariable pero en aumento, lo mismo para la capacidad de refrigeración. La razón para el incremento en la capacidad de refrigeración es la misma que se explicó en el ciclo de absorción para la misma gráfica de temperatura contra COP y capacidad. En este caso el fluido de trabajo es amoníaco cuya campana de saturación, en la línea de vapor saturado es de tipo húmedo, muy similar en forma a la del agua, por lo tanto la misma razón en el ligero incremento en la capacidad de refrigeración.

En cuanto al requerimiento geotérmico variando la temperatura en el evaporador es exactamente el mismo, se mantiene constante y esto se debe a que independientemente de la temperatura alcanzada en el evaporador, el generador siempre tiene que evaporar la misma cantidad de flujo de amoníaco en el mismo estado termodinámico por lo tanto la misma demanda de calor en él. Si esta demanda de calor se mantiene constante pero no así la capacidad de refrigeración por la razón explicada en el párrafo anterior, el COP presenta entonces el aumento observado en la Figura 4.10.

### 4.3 Comparación

Es necesario contrastar el desempeño de cada ciclo para las mismas condiciones de tal modo que se reflejen más factores para tener en consideración al momento de elegir alguno

de ellos en una aplicación específica. Comenzando la comparación se mantiene fijo el valor de 5 °C. Se hará la comparación ocupando únicamente el ciclo por absorción con intercambiador de calor, dada la cercanía de valores entre este y el mismo sin intercambiador.

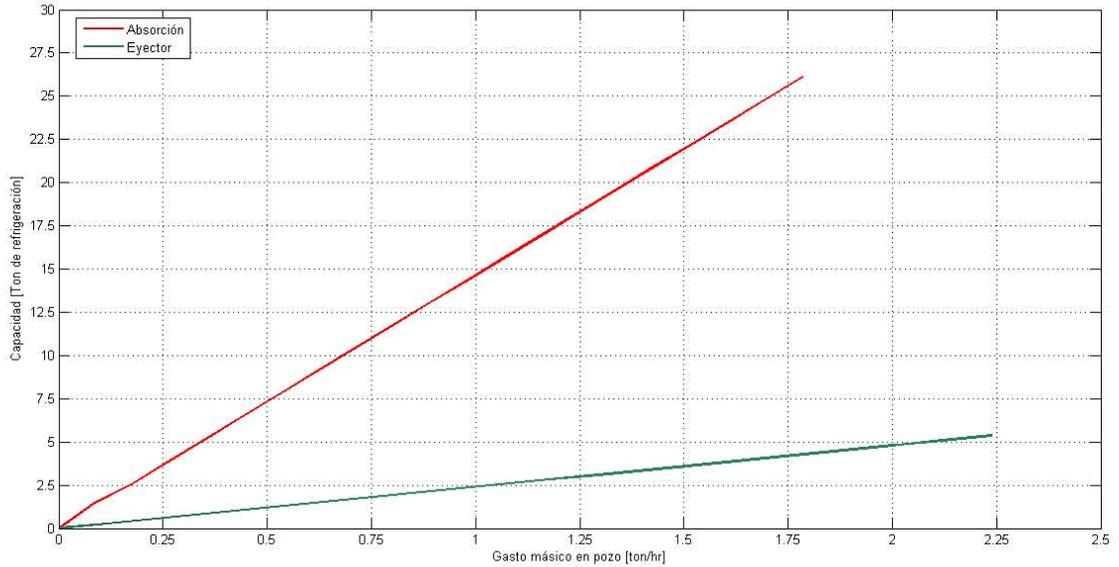


Figura 4.11 Comparación entre el ciclo por absorción y el ciclo por ejector

La variación en rendimiento es muy evidente entre ambos ciclos. Como puede observarse en la Figura 4.11, con menos flujo geotérmico se puede obtener una mayor capacidad de refrigeración, sin quedar el ciclo por ejector, por debajo de capacidades nominales de enfriadores en el mercado que van normalmente de 1 tonelada de refrigeración hasta 50, en los catalogados como minichillers. Esta variación tan notoria es reflejo del COP de cada ciclo.

Adicionalmente es de interés ver cómo se comportan ambos ciclos ante una variación en la temperatura de refrigeración, manteniendo de igual manera propiedades constantes y fijando a las condiciones ambientales del lugar, los parámetros.

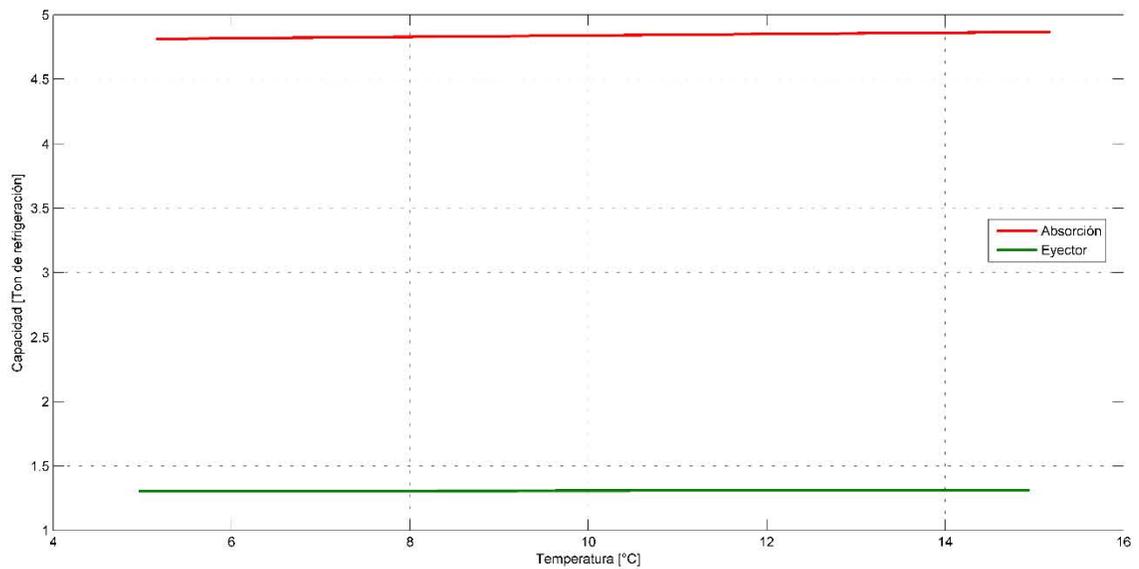


Figura 4.12 Comparación de ciclos ante una variación en la temperatura de refrigeración

En la Figura 4.12 ambos ciclos permanecen prácticamente constantes, sin embargo la pendiente registrada para el ciclo de absorción es de 0.0054, mientras que para el ciclo por eyector es de 0.001 lo que nos habla de una sensibilidad a la temperatura de refrigeración cinco veces mayor en el ciclo por absorción.

Por otro lado se compara el efecto refrigerante, en el ciclo por absorción tenemos un valor de 2424.89 [KJ/Kg] mientras que para el ciclo por eyector, es de 187.7 [KJ/Kg]. Este dato es de suma importancia ya que determina el dimensionamiento del ciclo según la capacidad de refrigeración requerida.

Finalmente se compara el requerimiento geotérmico para diferentes temperaturas de cada ciclo fijando la capacidad a 5 toneladas de refrigeración.

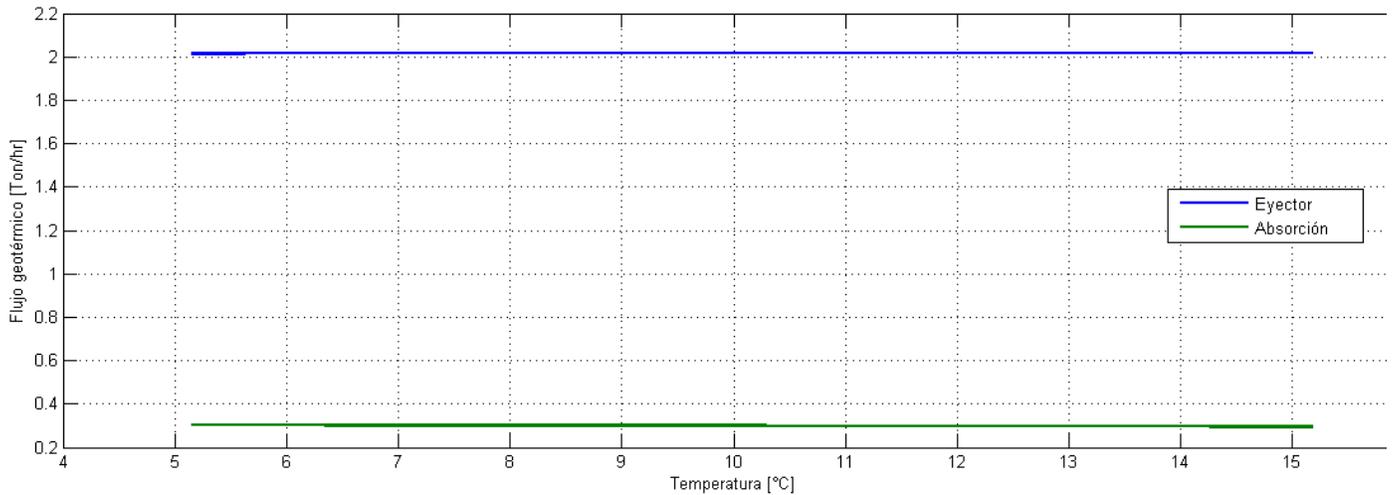


Figura 4.13 Requerimiento geotérmico ante una variación de temperatura para ambos ciclos

La Figura 4.13 hace evidente que el ciclo de absorción genera la misma capacidad a las mismas temperaturas con un caudal geotérmico aproximadamente seis veces menor que el ciclo por eyector.

### 4.3.1 Selección del ciclo

La implementación de alguno de los ciclos dependerá de las posibilidades y de la aplicación particular, así como también del pozo.

Los datos obtenidos anteriormente corresponden al pozo ubicado en La Caldera, Guanajuato, sin embargo la metodología es aplicable para cualquier otro pozo, por lo que puede ser utilizado como método para evaluar a cualquier otro pozo de la Tabla 1.3, sin embargo, los datos ya obtenidos son una referencia del comportamiento bajo circunstancias similares, por otro lado las condiciones de los lugares considerados en la Tabla 1.3 no presentan una variación muy grande, de manera que las simulaciones son el punto de partida al momento de seleccionar alguno para cierta aplicación, algún tipo de enfriador.

La selección del ciclo, además de la comparación cuantitativa a través de las gráficas de comparación, dependerá en gran medida de la comparación cualitativa por medio de las ventajas y desventajas que cada uno presenta sobre el otro. En la sección 3.5 Comparación

entre las tecnologías de refrigeración térmica. Se han presentado las ventajas y desventajas de cada tipo de ciclo. A manera de resumen, se presenta en la Tabla 4. 3y la comparación cuantitativa y cualitativa de los ciclos seleccionados para estudio

Absorción	Eyector	Absorción	Eyector
Ventajas		Desventajas	
Más estudiado y desarrollado	Menor mantenimiento	Más dispositivos que conforman al ciclo	COP seis veces menor
COP relativamente alto	Puede trabajar en movimiento o en sistemas con altas vibraciones	Tiene que permanecer completamente fijo	Poca disponibilidad
Alta disponibilidad en el mercado	Puede trabajar con prácticamente cualquier refrigerante, incluso únicamente con agua	Cristalización en absorbente, par de fluidos y más dispositivos generan mayor mantenimiento	Mayor demanda de flujo geotérmico (del orden de Ton/hr) para las mismas capacidades de refrigeración

Tabla 4. 3 Comparación cualitativa entre el ciclo de absorción y por eyector

Capacidad	Aplicación	Absorción	Eyector	Absorción	Eyector
		COP		Gasto geotérmico (Ton/hr)	
1 Ton de Refrigeración	Aire acondicionado 15 °C	0.95	0.15	0.087	0.425
	Alimentos 7 °C	0.93	0.15	0.088	0.425
	Cadena de frío (Almacenamiento) 5°C	0.93	0.15	0.089	0.425
5 Ton de Refrigeración	Aire acondicionado 15 °C	0.95	0.15	0.33	2.13
	Alimentos 7 °C	0.93	0.15	0.34	2.13
	Cadena de frío (Almacenamiento) 5°C	0.93	0.15	0.34	2.13
10 Ton de refrigeración	Aire acondicionado 15 °C	0.95	0.15	0.67	4.19
	Alimentos 7 °C	0.93	0.15	0.68	4.19
	Cadena de frío (Almacenamiento) 5°C	0.93	0.15	0.69	4.19

Tabla 4. 4 Comparación cuantitativa entre el ciclo de absorción y por eyector

### 4.3.2 Ahorro esperado

La implementación de cualquiera de estos ciclos analizados espera economizar electricidad, justo el recurso que se emplea actualmente para los fines de refrigeración. Con el COP de cada uno podemos entonces estimar el ahorro energético una vez implementado, suponiendo un COP de 5 para la máquina de refrigeración por compresión que operaría en su lugar.

Se tomará una producción de frío de 1 Tonelada para obtener el ahorro por unidad de refrigeración:

De la Ec. 2.3 sabemos que:

$$W = \frac{Q_L}{COP}$$

*Donde:*

*W es la energía requerida para el funcionamiento de la máquina*

*Q<sub>L</sub> Es la producción de frío*

Usando la definición de la Ec. 2.8 podemos entonces calcular la potencia requerida para el ciclo por compresión y de las simulaciones, el consumo de la bomba para los ciclos térmicos. Finalmente haciendo la diferencia entre la potencia demandada por la bomba en cada ciclo térmico con la potencia consumida en el ciclo convencional, podemos encontrar el ahorro eléctrico. La aplicación de refrigeración por otro lado, determinará el tipo de consumo eléctrico que se tenga, para el caso a analizar se supondrá un consumo comercial. Realizando una tendencia anual de los datos obtenidos del sector eléctrico nacional (SectorEléctricoNacional, 2016) para el costo del KWh por año, podemos estimar que en el 2016 el costo promedio nacional del KWh es de 315.51 centavos. El ahorro económico dependerá del ahorro eléctrico y del factor de planta de cada ciclo. Se sabe que el ciclo por absorción requiere de mayor mantenimiento que el ciclo por eyector, considerando un mantenimiento de una vez por mes para el ciclo por

## Refrigeración térmica

absorción y de una vez cada tres meses para el eyector tenemos factores de planta de 0.96 y 0.99 respectivamente, mientras que para el ciclo por compresión se considera un factor de planta de 0.9.

Ciclo	COP	Potencia Kwe	Factor de planta	KWh anual	Ahorro anual [\$/Ton]
Compresión	5	0.7020	0.9	5534.568	-
Absorción	0.93	0.0470	0.96	395.2512	16,215.06
Eyector	0.15	0.2490	0.99	2159.4276	10,648.91

*Tabla 4.5 Ahorro anual esperado por Tonelada de refrigeración*

De la Tabla 4.5 podemos ver que para producciones de frío mayores, el ahorro en cuanto a operación se va volviendo más significativo, tomando en cuenta que por ejemplo en absorción, fácilmente podemos encontrar chillers de 50 o 100 toneladas de refrigeración. Suponiendo desde luego que operaran a su máxima capacidad.

# Capítulo 5

## Conclusiones y trabajo futuro

Los sistemas de refrigeración presentados en este trabajo son una alternativa a la refrigeración convencional que consume electricidad para su funcionamiento. Al haber analizado un ciclo de sorción y uno termomecánico, se ha determinado un desempeño inferior al que ofrece un ciclo por compresión. Sin embargo tras hacer un pequeño análisis económico podemos demostrar que bajo el hecho de que sustituimos prácticamente todo el consumo eléctrico, hay efectivamente un ahorro, que si bien sólo fue mostrado el de operación, conviene analizar el de inversión inicial y el de transporte para el caso de almacenes frigoríficos. Recordando también que con la información tratada es posible extender la eventual elección del ciclo a todas las tecnologías de refrigeración térmica

Este ahorro es independiente de la inclusión de geotermia en su operación (cualquier fuente de calor acciona los ciclos), sin embargo, al considerar esta fuente energética, se explota en sus usos directos y de manera inmediata, pues una empresa de este tipo únicamente puede ser considerada donde ya se tiene el recurso geotérmico disponible; por otro lado, su uso evita que se consuma electricidad proveniente de alguna termoeléctrica, disminuyendo la producción de CO<sub>2</sub>, sabiendo que el 15% de dicha producción proviene de sistemas de refrigeración. Sumado a esto, la geotermia, dentro del catálogo de energías renovables ofrece factores de planta superiores a cualquier otra dado que su disponibilidad es continua sin importar, estación del año u hora del día.

La aplicación de estos sistemas es extensible llevando a cabo las modificaciones necesarias. Este trabajo presentó dos sistemas para condiciones específicas, no obstante, la metodología descrita puede aplicarse a numerosas situaciones diferentes según: región geotérmica y aplicación, abarcando la mayoría de los procesos comerciales que requieran producción de frío. Como ejemplo tenemos el aire acondicionado de las oficinas que se

encuentran alrededor de los yacimientos geotérmicos que generalmente son zonas calientes, o el almacenamiento de productos perecederos para la industria alimenticia. Es importante considerar que el desempeño final estará afectado por el equipo empleado, se recuerda que los dispositivos en las simulaciones trabajan con consideraciones generales dado que la aplicación, presupuesto y alcance determinará las condiciones particulares de cada dispositivo.

Este trabajo es el comienzo de un análisis más detallado para un uso definido. Ofrece el panorama general a una solución sustentable, limpia, innovadora y económicamente considerable para el problema actual de consumo excesivo de electricidad, mostrando adicionalmente datos que filtran una decisión en cuanto a selección de equipo.

Como trabajo a futuro se planea la construcción de alguno de los dos ciclos simulados, con una inclinación al de eyector por ser más sencillo, validando de forma experimental los datos y evaluando su funcionamiento bajo diferentes circunstancias.

# Bibliografía

- Al-Alili, A., Hwang, Y., & Radermacher, R. (2013). *Review of Solar Thermal Air Conditioning Technologies*. International Journal of Refrigeration.
- ASHRAE, H. (2005). *Fundamentals Volume*. Atlanta.
- Caldera, R. (2015). *Google Maps*. Obtenido de [https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=z\\_-vO8za\\_Jxs.knBlf\\_ty72DM](https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=z_-vO8za_Jxs.knBlf_ty72DM)
- Christian, J. (1997). *Central Cooler-Absorptive Chiller*. Oak Ridge.
- ClimateWell. (26 de junio de 2016). *Climate Well*. Obtenido de <http://www.climatewell.com/verdacc>
- D. Rafferty, K. (s.f.). *Absorption Refrigeration*. Klamath Falls: Geo-Heat Center.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (1988). *¿Qué es la energía geotérmica?* Pisa, Italia: Instituto di Geoscienze e Georisore, CNR.
- DiPippo, R. (2007). *Geothermal Power Plants*. Dartmouth, Massachusetts: BH.
- Dr. Mands, E., & Dr. Sanner, B. (1968). *Energía Geotérmica a Poca Profundidad*. Wetzlar, Alemania: UBeG.
- FIDE. (2009). *Taller Sobre la Envoltura Térmica y el Ahorro de Energía Eléctrica*.
- Gherardelli, C. (s.f.). *Relaciones Termodinámicas para un Gas Ideal*. U. de Chile.
- Gutiérrez-Negrín, L. C., Maya-González, R., & Luis, Q.-L. J. (2015). *Present Situation and Perspectives of Geothermal in Mexico*. Melbourne, Australia.
- H., C., & Armstead, H. (1989). *Energía Geotérmica*. México D.F.: Limusa.
- Hua, Z.-Z., Zhang, H., Liu, B.-L. L., & Wu, S.-Y. (2012). *Refrigeration Technology*. Oxford: Alpha Science.

- iea. (2012). *Technology Roadmap Solar Heating and Cooling*. International Energy Agency, Paris. Obtenido de [www. iea.org](http://www.iea.org)
- IMPULSAIV. (2008). *Desalación de agua de mar con energías renovables*.
- INEGI. (2014). *Anuario Estadístico y Geográfico de México*. México.
- InternationalEnergyAgency. (2014). *Monthly Electricity Statistics*.
- Jiménez Aviña, H. (2015-II). Notas de clase de temas selectos de termofluidos. *Semestre 2015-II*.
- Kinsara, A. A., Elsayed, M. M., & Al-Rabghi, O. (1995). *Proposed Energy-Efficient Air-Conditioning System Using Liquid Desiccant*. Gran Bretaña: Pergamon.
- Kinsara, A. A., Elsayed, M. M., & Al-Rabghi, O. M. (1995). *Porposed Energy-Efficient Air-Conditioning System Using Liquid Desiccant*. Great Britain: Pregamon.
- Lazzarin, R., Gasparella, A., & Longo, G. (1998). *Cghemical Dehumidification by Liquid Desiccants: Theory and Experiment*. International journal of Refrigeration.
- Le Bert, D. G. (2011). *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*. México, DF.
- Lienau, P. J., & Lunis, B. C. (1991). *Gethermal direct use engineering and design guidebook*. Oregon.
- Llopis Trillo, G., & Rodrigo Angulo, V. (2008). *Guía de la energía Geotérmica*. Madrid: La Suma de Todos.
- Llopis, R., Cabello, ., R., Sánchez, D., & E., T. (2010). *Problemas Resueltos de Producción de Frío y Sicrométria : tablas y diagramas*. Madrid: AMV Ediciones.
- Masoud Rezk, A. R. (2012). *Theoretical and Experimental Investigation of Silica Gel/Water Adsorption Refrigeration Systems*. University of Birmingham, School of Mechanical Engineering.

- Mateo Sánchez, L., & Santana Santana, D. (s.f.). *Análisis de los Deshumidificadores con Rueda Desecante*. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos.
- Milazzo, A., & Rochetti, A. (2015). *Modeling of Ejector Chillers with Steam and other Working Fluids*. Universidad de Florencia, Departamento de Ingeniería Industrial, Florencia.
- Nehdi, E., Kairouani, L., & Elakhdar, M. (2008). *A Solar Ejector Air-conditioning System Using Environment-friendly Working Fluids*.
- Núñez, T. (2010). *Thermally Driven Cooling: Technologies, Developments and Applications*. Freiburg: Journal of Sustainable Energy.
- Rafferty, K. D. (s.f.). *Absorption Refrigeration*. Geo-Heat Center, Klamath Falls.
- Ramadan, M., El Rab, M., & Khaled, M. (2015). *Parametric Analysis of Air-Water Heat Recovery Concept Applied to HVAC Systems: Effect of Mass Flow Rates*. Case Studies in Thermal Engineering.
- Refrinoticias. (17 de 11 de 2010). *Refrinoticias al Aire*. Obtenido de <http://refrinoticias.com/?p=93>: <http://refrinoticias.com/?p=93>
- Rybach, L., & Muffler, L. (1981). *Geothermal systems principles and histories*. Malta: British library.
- SectorEléctricoNacional. (12 de junio de 2016). *SENER Secretaría de Energía*. Obtenido de <http://egob2.energia.gob.mx/portal/electricidad.html>
- Tarback, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física*. Madrid: Pearson Educación S.S.

- Tassou, S. (s.f.). Emerging Refrigeration Technologies - What technologies can we expect to utilise in the future. Recuperado el 17 de 03 de 2016, de [http://www.grimsby.ac.uk/documents/defra/08Jun10\\_NovelRefrigeration.pdf](http://www.grimsby.ac.uk/documents/defra/08Jun10_NovelRefrigeration.pdf)
- Tassou, S., J.S., L., Ge, Y., Hadaway, A., & Chaer, I. (2009). *A Review of Emerging Technologies for Food Refrigeration Applications*. Applied Thermal Engineering.
- Ullah, K., Saidur, R., Ping, H., Akikur, R., & Shuvo, N. (2013). *A Review of Solar Thermal Refrigeration and Cooling Methods*. Obtenido de [www.elsevier.com/locate/rser](http://www.elsevier.com/locate/rser)
- Vidal, H., & Colle, S. (2009). *Simulación Horaria de un Sistema de Refrigeración Combinado Ejector-Compresión de Vapor Asistido por Energía Solar*. Revista Chilena de Ingeniería.
- Wang, F., Shen, S., & Li, D. (2015). *Evaluation on Environment Friendly Refrigerants with Similar Normal Boling Points in Ejector Refrigerant System*. Springer.
- Wang, K. P., & Vineyard, E. A. (2011). *New Opportunities for Solar Adsorption Refrigeration*. ASHRAE.
- White, F. M. (2009). *Fluid Mechanics*. New York: Mc Graw Hill.
- [www.elaireacondicionado.com](http://www.elaireacondicionado.com). (15 de Febrero de 2016). *Ventilación y climatización*. Obtenido de <http://www.elaireacondicionado.com/articulos/ventilacion-climatizacion>
- Zurita, A. (06 de Marzo de 2013). Impacto de los Sectores Refrigeración - Aire Acondicionado - Espumas en el Cambio Climático. Ciudad de México, México.