



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SELECCIÓN DEL FLUIDO DE TRABAJO PARA EL  
CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN  
INSTANTÁNEA (CBEI)**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO**

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

**MENDOZA RAMÍREZ MISAEL JOSHIMAR**



**DIRECTOR DE TESIS:  
M.I. HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ**

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



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



“Si supiera que el mundo se acaba mañana, yo, hoy todavía, plantaría un árbol”.

*Martin Luther King Jr*



## Contenido

Acrónimos .....	vii
Nomenclatura.....	ix
Resumen.....	xi
Introducción .....	xiii
Objetivos .....	xv
1. Energía Geotérmica y su aprovechamiento .....	1
Introducción .....	1
1.1 Geotermia .....	3
1.2 Yacimientos geotérmicos y su clasificación .....	5
1.3 Estudios para el aprovechamiento de la energía geotérmica.....	7
1.4 Energías renovables en México y en el mundo.....	8
1.5 La geotermia como energía renovable .....	11
1.6 Usos directos con geotermia.....	12
1.7 Generación de energía eléctrica con energía geotérmica .....	14
Conclusión .....	16
2. Ciclo Binario de Evaporación Instantánea (CBEI) .....	19
Introducción .....	19
2.1 Ciclos de potencia .....	21
2.2 Descripción general del CBEI.....	24
2.3 Análisis termodinámico.....	26
2.4 Características de los equipos.....	28
2.5 Ciclos binarios explotando energía geotérmica.....	32
2.5 Conclusión .....	34
3. Selección del fluido de trabajo .....	37
Introducción .....	37
3.1 Metodología de selección .....	39
3.2 Refrigerantes y sus características .....	40
3.3 Pre-selección .....	41
3.4 Eficiencia exergética.....	42
3.5 Matriz de decisión .....	46
3.5.1 Definición de porcentajes de importancia entre parámetros.....	46
3.5.2 Ponderación de cada parámetro.....	49

3.5.3 Construcción de la matriz de decisión .....	61
3.6 Conclusión .....	62
4. Análisis exergético.....	63
Introducción .....	63
4.1 Termodinámica del butano en el CBEI .....	65
4.2 Termodinámica del R245fa en el CBEI .....	66
4.3 Balance de exergía .....	67
4.4 Impacto de la exergía destruida.....	70
4.5 Conclusiones.....	75
Información adicional.....	77
Legislación en México para el uso de refrigerantes.....	77
5. Conclusiones.....	79
Bibliografía .....	81

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. 1 Estructura interna de la Tierra (Bastante, 2015).....	3
Ilustración 1. 2 Participación estimada de fuentes de energía en la producción mundial (REN21, 2015).....	9
Ilustración 1. 3 Capacidad efectiva en México por tecnología, Marzo (SENER, 2016).....	9
Ilustración 1. 4 Adición de capacidad por tecnología, 2015 – 2029 (SENER, 2015) .....	10
Ilustración 1. 5 Ventajas y desventajas del uso de la energía geotérmica. ....	12
Ilustración 1. 6 Capacidad instalada mundial para usos directos (W. Lund & L. Boyd, 2015). .....	13
Ilustración 1. 7 Utilización mundial en usos directos de geotermia (W. Lund & L. Boyd, 2015). ....	14
Ilustración 1. 8 Mapa del potencial de los recursos geotérmicos en México (SENER, 2013) 15	
Ilustración 2. 1 Ciclo a contrapresión (Aviña, 2015).....	21
Ilustración 2. 2 Ciclo a condensación (Aviña, 2015). ....	22
Ilustración 2. 3 Ciclo binario (Aviña, 2015).....	23
Ilustración 2. 4 Prototipo del Ciclo Binario de Evaporación Instantánea (CBEI) .....	25
Ilustración 2. 5 Diagrama del CBEI. (Benítez Torreblanca, 2015).....	26
Ilustración 2. 6 Diagrama T-S del CBEI (Russell, 2016) .....	26
Ilustración 2. 7 Intercambiador de placas (Rodríguez, 2013) .....	29
Ilustración 2. 8 Placa orificio (Bonilla, 2015) .....	30
Ilustración 2. 9 Separador de flujos (Sierra, 2014) .....	31
Ilustración 2. 10 Condensador (Bernal, 2014) .....	31
Ilustración 2. 11 Mezclador (IIDEA, 2014).....	32
Ilustración 2. 12 Distribución de capacidad y producción de plantas geotérmicas (Bertani, 2015) .....	33
Ilustración 3. 1 Comparativa entre usar en el ciclo agua como fluido de trabajo o un fluido orgánico. ....	37
Ilustración 3. 2 Diagrama de flujo para la selección .....	39
Ilustración 3. 3 Clasificación de los refrigerantes propuestos por su composición química. 41	
Ilustración 3. 4 Curvas temperatura de separación vs eficiencia exergética .....	44
Ilustración 3. 5 Parámetros para la matriz de decisión. ....	46
Ilustración 3. 6 Volumen de control (Intercambiador de placas). ....	50
Ilustración 3. 7 Diagramas T-S. Tipos de fluido. ....	53
Ilustración 3. 8 Clasificación de fluidos respecto a su grado de inflamabilidad y toxicidad. (ASHRAE Standard 34, 2007) .....	55
Ilustración 3. 9 Destrucción de ozono (AFP, 2015).....	57
Ilustración 3. 10 Procesos del efecto invernadero (UNEP-GRID-Arendal, 2015) .....	59
Ilustración 3. 11 Distribución de emisiones de GEI en el mundo (El Banco Mundial, BIRF - AIF, 2015) .....	60

Ilustración 4. 1 Diagrama T-S del CBEI con butano.....	65
Ilustración 4. 2 Diagrama T-S del CBEI con R245fa.....	66
Ilustración 4. 3 Distribución de exergía destruida con R245fa .....	69
Ilustración 4. 4 Distribución de exergía destruida con butano .....	69
Ilustración 4. 5 Contribución de exergía destruida con butano (eficiencia isentrópica).....	72
Ilustración 4. 6 Contribución de exergía destruida con butano (presión de condensación). 73	
Ilustración 4. 7 Contribución de exergía destruida con butano (acercamiento) .....	75

## Índice de Tablas

Tabla 1. 1 Origen del calor emitido por la Tierra (Pous & Jutglar, 2004). .....	4
Tabla 1. 2 Etapas para el aprovechamiento de la energía geotérmica (Secretaría de Energía Argentina, 2015). .....	8
Tabla 1. 3 Generación bruta y capacidad efectiva en energías renovables en México, Marzo (SENER, 2016). .....	10
Tabla 1. 4 Capacidad instalada en México (Gutiérrez Negrín, 2015).....	15
Tabla 1. 5 Proyectos para la explotación de recursos geotérmicos CFE (SENER, 2013).....	16
Tabla 2. 1 Ventajas y desventajas de los ORC (Quoilin, 2013) .....	24
Tabla 2. 2 Plantas geotérmicas por tecnología en el mundo (Bertani, 2015) .....	33
Tabla 2. 3 Plantas geotermoeléctricas en México (Gutiérrez Negrín, 2015) .....	35
Tabla 3. 1 Temperaturas críticas de los fluidos a analizar .....	41
Tabla 3. 2 Datos técnicos del CBEI.....	43
Tabla 3. 3 Resultados del análisis exergético .....	45
Tabla 3. 4 Ponderación respecto a la eficiencia exergética .....	45
Tabla 3. 5 Criterios de comparación de los parámetros.....	47
Tabla 3. 6 Matriz comparativa entre parámetros.....	48
Tabla 3. 7 Ponderación con respecto a su peso molecular. ....	49
Tabla 3. 8 Ponderación de cada fluido con respecto a su calor latente .....	51
Tabla 3. 9 Ponderación de cada fluido con respecto a su punto de ebullición.....	52
Tabla 3. 10 Ponderación respecto al grado de humedad.....	54
Tabla 3. 11 Ponderación según el nivel de seguridad (ASHRAE Standard 34, 2007) .....	56
Tabla 3. 12 Ponderación de cada fluido con respecto a su valor en el índice ODP. Fuentes	58
Tabla 3. 13 Ponderación para cada fluido en base a su valor del índice GWP. Fuentes .....	60
Tabla 3. 14 Matriz de decisión .....	61
Tabla 4. 1 Datos termodinámicos con butano .....	65
Tabla 4. 2 Datos termodinámicos con R245fa .....	66
Tabla 4. 3 Balance de exergía por dispositivo. ....	68

Tabla 4. 4 Datos de destrucción de exergía por equipo .....	68
Tabla 4. 5 Análisis exergético en la turbina con butano (eficiencia isentrópica) .....	71
Tabla 4. 6 Análisis exergético en la turbina con R245fa (eficiencia isentrópica) .....	71
Tabla 4. 7 Análisis exergético en la turbina (presión de condensación).....	73
Tabla 4. 8 Análisis exergético en el intercambiador de calor (acercamiento) .....	74



## Acrónimos

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air – Conditioning Engineers</i>
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CBEI	Ciclo Binario de Evaporación Instantánea
CFC	Clorofluorocarbono
FT	Fluido de trabajo
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HC	Hidrocarbano
HCFC	Hidroclorofluorocarbono
HFC	Hidrofluorcarbono
IIDEA	Instituto de Ingeniería, Desalación y Energías Alternas
ODP	<i>Ozone Depletion Potential</i>
ORC	<i>Organic Rankine Cycle</i>
PIE	Productores Independientes de Energía
PWG	<i>Pressure Water Generation</i>
REN21	<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i>
SENER	Secretaría de Energía
TLV	<i>Threshold Limit Value</i>
TWA	<i>Time Weighted Average</i>



## Nomenclatura

$z$	Altura	$q$	Potencia específica
atm	Atmósfera	$P$	Presión
bar	Bar	T/h	Tonelada por hora
$x$	Calidad	$T$	Temperatura
$C_p$	Calor específico a presión cte.	$T_{sepopt}$	Temperatura de separación óptima
US¢/kW	Centavo de dólar por kilowatt	$T_{cond}$	Temperatura en el condensador
W/m °C	Conductividad térmica	$T_{inter}$	Temperatura en el intercambiador
US\$/kW	Dólar por kilowatt	TJ/año	Terajuole por año
$\eta_g$	Eficiencia del generador	$w$	Trabajo específico
$\eta_{II}$	Eficiencia exergética	$W_{neto}$	Trabajo neto
$\eta_b$	Eficiencia isentrópica de la bomba	$v$	Velocidad
$\eta_t$	Eficiencia isentrópica de la turbina	$W$	Watt
$h$	Entalpía		
$s$	Entropía		
E, X	Exergía		
$\dot{m}_{FT}$	Flujo másico del fluido de trabajo		
$\dot{m}_{FG}$	Flujo másico geotérmico		
GWh/año	Gigawatt por año		
°C/km	Gradiente térmico		
°C	Grados Centígrados		
K	Kelvin		
g/mol	Gramos por mol		
$g$	Gravedad		
kcal	Kilocalorías		
kg	Kilogramos		
kJ	Kilojoule		
km	Kilómetro		
kW	Kilowatt		
MPa	Megapascal		
MW	Megawatt		
Mwe	Megawatt eléctrico		
MWh	Megawatt hora		
MWt	Megawatt térmico		
$m$	Metro		
ppm	Partes por millón		
$\dot{Q}_{in}$	Potencia calorífica de entrada		
$\dot{W}_{b1}$	Potencia de la bomba 1		
$\dot{W}_{b2}$	Potencia de la bomba 2		
$\dot{W}_t$	Potencia de la turbina		
$\dot{Q}_{out}$	Potencia calorífica de salida		



# Resumen

En el presente trabajo se realiza una integración de metodologías para la selección del fluido de trabajo para el prototipo de un ciclo binario realizado por el grupo IIDEA del Instituto de Ingeniería, UNAM, que lleva por nombre Ciclo Binario de Evaporación Instantánea (CBEI) y tiene el objetivo el aprovechamiento de recursos geotérmicos de baja y medía entalpía. Para la selección se toma en cuenta parámetros de las propiedades termo físicas del fluido, de seguridad, aspectos ambientales y eficiencia exergética. El fluido de trabajo que se propone implementar es un fluido orgánico y que debido a sus condiciones lo hace aceptable para la aplicación en el aprovechamiento de recursos de baja temperatura. La evaluación de los fluidos candidatos se realiza de forma independiente para cada parámetro y éstas se conjuntan en una matriz de decisión para una evaluación global.

El resultado de la selección concluye en implementar butano como fluido de trabajo. El butano presenta la desventaja importante al ser una sustancia altamente inflamable, por lo que compromete la seguridad del sistema si no se tiene un adecuado manejo. Esta sustancia fue el segundo fluido que presentó la mejor eficiencia exégetica y tiene un bajo impacto ambiental, condiciones por lo que lo colocaron como el mejor fluido.

También se presenta un análisis de exergía en cada equipo que constituyen al CBEI utilizando como fluido de trabajo las sustancias seleccionadas para detectar donde se presenta la mayor destrucción de exergía. Se obtuvo como resultado que la mayor destrucción de exergía se presenta en el intercambiador de calor y en la turbina. La eficiencia exergética del ciclo se observó que es más sensible a la variación de la eficiencia isentrópica, a medida que es más eficiente la turbina, la eficiencia del ciclo aumenta y la exergía destruida disminuye.



# Introducción

El ser humano desde el descubrimiento de la energía Geotérmica ha dispuesto de ella como fuente de calefacción, balneología y secado de pieles. Su potencial se estima que es del orden de 420 GW y proveniente de varios fenómenos naturales como el movimiento constante de las placas tectónicas y el calor contenido desde la formación del planeta. La transferencia de energía se realiza a través de fracturas en las placas tectónicas y por conducción a través de las rocas adyacentes a los recursos geotérmicos.

Actualmente México se ubica en el cuarto lugar de capacidad instalada en energía geotérmica para la utilización en la generación de energía eléctrica; sin embargo, no se ha aprovechado en otros procesos industriales o en usos directos como el caso de otros países. Una aplicación que bien podría ser implementada en nuestro país sobre todo en la zona del norte, es la climatización de recintos donde los países como China, Turquía, Francia y Rusia son los que mayor han aprovechado este recurso.

Nuestro país cuenta con gran potencial geotérmico de baja y media entalpía, los cuales pueden ser aprovechados para distintos usos y en lo que respecta a este trabajo, se centra en la utilización para la generación de energía eléctrica. El Grupo IIDEA del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México propone un diseño de un ciclo el cual lleva por nombre “Ciclo Binario de Evaporación Instantánea” (CBEI) que está planeado para tener una generación neta de 10 kW que podría ser aplicado en zonas aisladas del sistema eléctrico.

En gran medida la eficiencia del ciclo depende del fluido de trabajo con el que opere. Estos fluidos de trabajo, según sea su naturaleza, varían sus propiedades termofísicas, su grado de humedad, seguridad e impacto ambiental. El agua por excelencia es el mejor fluido de trabajo que podemos disponer al ser un fluido con un calor específico de bajo valor con respecto a otros fluidos como el aire y permite el buen aprovechamiento de una fuente de calor; también es un recurso de bajo costo.

Los refrigerantes tienen la propiedad de tener un bajo punto de ebullición y tienen mejor desempeño en el transporte de energía en comparación con el agua, propiedades por lo que son utilizados en sistemas térmicos como en el caso de refrigeradores y en el sistema de enfriamiento de automóviles. Los ciclos de generación que utilizan estos fluidos como fluido de trabajo son denominados como Ciclos Rankine Orgánicos o también como *ORC* por sus siglas en inglés. Con base en lo antes mencionado se propone utilizar un refrigerante en el CBEI y poder aprovechar recursos de baja temperatura.

En el diseño e implementación de los *ORC*, se contempla la regulación ambiental del país donde se pretenda instalar la unidad. En algunos países existe una rigurosa regulación con aquellas sustancias que deterioren la capa de ozono o que contribuyan al efecto invernadero, por ello es importante tomar en cuenta las propiedades ambientales de cada fluido. México basa algunas normas sobre el uso de refrigerantes en los acuerdos internacionales: “Tratado de Montreal” y “Protocolo de Kyoto”. En ambas normativas los países del mundo suscritos se comprometen a reducir progresivamente las sustancias que dañen la capa de ozono así como reducir los gases de efecto invernadero.

Como material adicional se presentará un análisis de exergía en los equipos que componen al CBEI con el objetivo de evaluar los fluidos seleccionados e identificar en donde se origina la mayor destrucción de exergía. La pérdida de energía en las máquinas térmicas es un hecho inevitable y es importante considerarse en su diseño y obtener una evaluación económica y buscar alternativas que contribuyan a la disminución de ésta.

## Objetivos

- Llevar a cabo una integración de metodologías para la selección del fluido de trabajo para el Ciclo Binario de Evaporación Instantánea (CBEI) que tiene como objetivo el aprovechamiento de recursos geotérmicos de baja y media entalpía.
- Definir los parámetros importantes que intervienen en la selección del fluido de trabajo y así llevar a cabo una matriz de decisión para realizar una evaluación global y determinar aquellos con mejor desempeño en la aplicación.
- Proporcionar los datos necesarios del fluido de trabajo seleccionado para el diseño de una turbina para el CBEI.
- Identificar en que equipo del CBEI se presenta la mayor destrucción de exergía y determinar la sensibilidad que tiene la eficiencia exérgica ante la variación de los parámetros de los equipos donde se presente la mayor contribución de este fenómeno.
- Resaltar la importancia y la viabilidad del uso de la energía geotérmica de baja y media entalpía para usos industriales y en especial en la generación de energía eléctrica.





# 1. Energía Geotérmica y su aprovechamiento

## Introducción

El origen del Sistema Solar como lo conocemos hoy en día, data de hace unos 12,000 a 15,000 millones de años. El *Big Bang* es una teoría que describe el origen del universo, menciona que todo inició con una gran explosión proveniente de algo infinitamente pequeño, denso y caliente, que aún sin comprenderse los motivos, lanzó hacia el exterior toda la materia del universo a altas velocidades. En ese momento, los restos de la explosión consistían casi por completo de hidrógeno y helio empezaron a enfriarse y condensarse en las primeras estrellas y galaxias. En una de las galaxias formadas, la Vía Láctea, fue donde nuestro Sistema Solar y el planeta Tierra tomaron forma (Bustamante, 2015).

El planeta tierra se formó hace 4,600 millones de años a partir probablemente de materia sobrante de la formación del Sol, que agrupada en varias partes formaron una bola incandescente de roca y metal y que a medida que transcurrió el tiempo comenzó a enfriarse dándose las condiciones que originó la vida. Una fracción de esta energía liberada en forma de calor aún sigue presente en el núcleo terrestre y llega a la superficie como emanaciones gaseosas debido a la transferencia de calor entre las capas de tierra que constituyen el planeta (Bustamante, 2015).

El calor interno de la Tierra tiene un inmenso potencial, sin embargo, solo una pequeña fracción del mismo puede ser aprovechada por el hombre como se ha venido haciendo desde épocas remotas. En la actualidad, los avances tecnológicos permiten la transformación de esta energía en energía eléctrica o también para utilizarla en otros procesos industriales como el caso de la deshidratación de alimentos, secado de pieles, desalación de agua de mar, etc.





## 1.1 Geotermia

El origen de la palabra “Geotermia” proviene del griego, “*geos*” que significa tierra y de “*thermos*” que significa calor: el calor de la Tierra. Este término se utiliza indistintamente para designar tanto a la ciencia que estudia los fenómenos térmicos que se llevan a cabo en el interior de planeta así como a todos aquellos procesos industriales que tienen como objetivo el aprovechamiento de dicha energía para usos específicos que cumplen con necesidades del ser humano (Díaz, 2015).

### Estructura interna de la Tierra.

En la formación de la Tierra tuvo como resultado la formación de tres capas definidas por su composición química: la corteza, el manto y el núcleo. El gradiente de temperatura y presión aumenta conforme a la profundidad; estos parámetros afectan directamente a las propiedades físicas y por tanto a las propiedades mecánicas de los materiales terrestres.

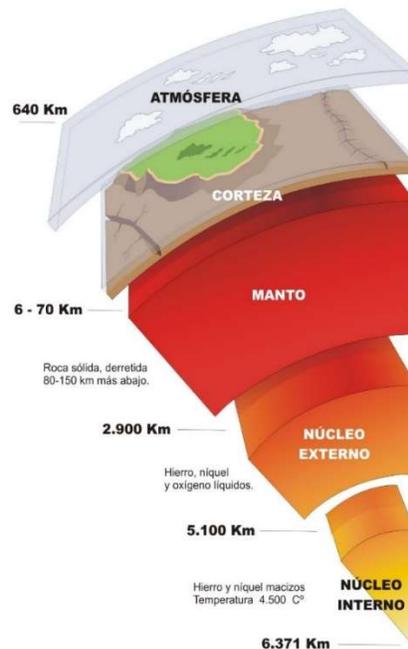


Ilustración 1. 1 Estructura interna de la Tierra (Bastante, 2015).

- El núcleo se encuentra en estado líquido en su parte exterior y sólido en el interior. Se cree que está compuesto por una aleación de hierro y níquel y en menores cantidades de oxígeno, silicio y azufre. Su temperatura oscila en los 4,500 °C.
- El manto constituye cerca del 82 % del volumen de la Tierra y es una envoltura rocosa sólida que se extiende hasta una profundidad de 2,900 km. La composición química varía en función de la profundidad en que se encuentre y se estima que la temperatura se encuentra en los 3,000 °C a 1,000 °C.



## 1. Energía Geotérmica y su aprovechamiento

- La corteza es la capa fina rocosa externa que se divide en corteza oceánica, que tiene un espesor de 7 km y la corteza continental con un espesor medio de entre los 35 y 40 km. Su temperatura varía desde los 1,000 °C en contacto con el manto y entre los 15 y 20 °C en la superficie terrestre (Llopis Trillo & Angulo, 2015).

### Origen de la energía Geotérmica

El origen del calor interno de la Tierra se debe a los siguientes fenómenos naturales:

- Desintegración de isótopos radiactivos. Se estima que cerca del 50% del flujo total de calor procede de estos átomos de vida larga y están presentes en la corteza y el manto, principalmente el uranio 235, uranio 238, torio 232 y potasio 40.
- Calor inicial. Energía liberada durante la formación de la Tierra y que todavía está llegando a la superficie.
- Movimiento en las placas tectónicas. La tierra no está conformada uniformemente, se constituye por porciones de tierra denominadas “placas tectónicas”, las cuales están en constante movimiento y que debido a estos desplazamientos se genera una gran fricción entre ellas liberando energía en forma de calor (Pous & Jutglar, 2004).
- Cristalización del núcleo terrestre. El hecho de que el núcleo interno crezca en un proceso de cristalización a partir del núcleo externo produce una fuente de energía que atrapa el calor y genera heterogeneidades, pues al hacerlo desarrolla un gradiente térmico radial que emite energía para mantener el campo magnético y produce una estructura relativamente compleja en el núcleo interno. (Fucugauchi, 2011).

Tabla 1. 1 Origen del calor emitido por la Tierra (Pous & Jutglar, 2004).

Origen	Lugar	Potencia x 10 <sup>12</sup> [W]
<b>Radiactividad</b>	Corteza continental	4.2 - 5.6
	Corteza oceánica	0.06
	Manto superior	1.3
	Manto inferior	3.8 - 11.6
	Núcleo	1.2 - 0
<b>Calor inicial</b>	Manto	7-14
	Núcleo	4-8
<b>Movimientos Diferenciales</b>	Manto	0 - 7
<b>Calor de diferenciación</b>		
Calor latente de cristalización	Núcleo externo	1 - 2.8
Energía gravitatoria		1
<b>Total</b>		42



En la Tabla 1. 1 se observan datos numéricos sobre el potencial que contribuye cada fenómeno descrito anteriormente y en qué zonas de la tierra se originan. El fenómeno que mayor potencial genera es la radiactividad en el manto inferior con un intervalo entre los 4.2 y 5.6 TW.

### Transferencia de calor terrestre

El calor contenido en el núcleo es transferido mediante las capas terrestres hasta llegar a la superficie y en algunas ocasiones se manifiesta con emanaciones superficiales como géiseres, ventilas marinas, entre otras. Dicha transferencia de calor se calcula analíticamente mediante el producto del gradiente térmico por la conductividad térmica de las rocas. El gradiente térmico es la variación de la temperatura en función de la profundidad y se expresa en °C/km. La conductividad térmica es una propiedad del material e indica la capacidad que tiene para conducir el calor y se expresa en W/m °C. En la corteza superior el gradiente térmico está en un intervalo de 20 – 30 °C por kilómetro. A una profundidad de 100 km, se estima una temperatura superior a los 1, 200 °C (Tarbuck & Lutgens, 2005).

La transferencia de calor se lleva a cabo de la siguiente manera: en la litosfera, que comprende la corteza y la parte rígida del manto, se produce la transferencia de calor por medio de conducción sin que haya transferencia de materia. En la astenosfera, que comprende la parte deformable del manto, el calor se propaga por medio de convección y con transferencia de materia. En la mesosfera que equivale al resto del manto, el calor se transfiere principalmente por convección. La endosfera se compone por el núcleo externo y el núcleo interno. En esta parte la transferencia de calor se da mediante convección y conducción respectivamente (Pous & Jutglar, 2004).

### 1.2 Yacimientos geotérmicos y su clasificación

Un yacimiento geotérmico se dice que es toda área geográfica que debido a sus condiciones geológicas y geotérmicas favorece el aprovechamiento de los recursos geotérmicos. Existen cinco tipos de yacimientos geotérmicos y cada uno está asociado con tecnologías específicas para su explotación.

- Yacimientos Hidrotermales. Son aquellos en donde se encuentra agua en estado líquido y vapor, en un intervalo de temperaturas entre los 40 y los 400 °C y presiones que van desde 3 a 10 bar. Poseen un contenido energético del orden de 200 – 600 kcal/kg (Velilla, 2015). En este tipo de yacimientos pueden clasificarse a sus vez en tres tipos:
  - Vapor dominante. Son yacimientos de alta entalpía y generalmente de vapor seco.
  - Líquido dominante (alta entalpía). Son aquellos donde la salmuera se encuentra a una temperatura entre los 200 y 300 °C. Un ejemplo de este tipo en México se encuentra en Cerro Prieto.



## 1. Energía Geotérmica y su aprovechamiento

- Líquido dominante (baja entalpía). Tienen salmuera con temperaturas de entre los 100 y 200 °C. Son más comunes que los anteriores y se encuentran en casi todos los países del mundo (Arellano, et al., 2008).
- De roca seca caliente. También conocidos como sistemas mejorados son aquellos que carecen de fluido que contenga la energía térmica. Generalmente estos yacimientos carecen de permeabilidad en las rocas que lo componen, pero se puede crear artificialmente a través de inyectar grandes volúmenes de agua a elevada presión para producir la fracturación del pozo, este proceso es llamado hidrofracturación. Se encuentran entre 2 y 4 km de profundidad y con temperaturas entre los 150 y 200 °C (Arellano, et al., 2008). Actualmente estos yacimientos son utilizados en la generación de energía eléctrica como el caso de *Fenton Hill* en Estados Unidos, Nuevo México donde la temperatura del reservorio se encuentre en los 235 °C y con una capacidad de la planta de 20MW (OpenEI, 2016).
- Geopresurizados. Este tipo de yacimientos contienen agua y metano disuelto a alta presión, del orden de los 700 bar y una temperatura media de 150 °C (Arellano, et al., 2008). Aún no se explotan comercialmente, sin embargo, existen proyectos demostrativos como el realizado por Louisiana Geothermal que explota un yacimiento de este tipo para demostrar la viabilidad comercial (U.S. Department of Energy, 2010).
- Marinos. Se caracterizan por tener alta entalpía y con localización en el fondo marino. Actualmente no se explotan comercialmente en el país, aunque mediante estudios preliminares en el Golfo de California se ha observado que a 2600 m de profundidad hay chimeneas naturales que descargan agua a 350 °C.
- Magmáticos. Se caracterizan por ser sistemas de roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos o gran profundidad. Las temperaturas en estos yacimientos son superiores a los 800 °C pero, en la actualidad no se cuenta con la tecnología y los materiales adecuados para resistir las altas temperaturas y así llevar a cabo el aprovechamiento de la energía contenida en ellos (Arellano, et al., 2008).

### Clasificación

Una clasificación (Muffler, 1978) de los yacimientos geotérmicos está en función de su temperatura, que mientras esta sea mayor, mayor será la entalpía que éste contenga.

- Alta entalpía. Son aquellos que tienen una temperatura por arriba de los 150 °C que permite su aprovechamiento para la generación de energía eléctrica.
- Media entalpía. Son aquellos donde su temperatura se encuentra entre los 90 °C y los 150 °C, estos también son utilizados para la generación de energía eléctrica y otros procesos industriales.



- Baja entalpía. Son aquellos donde su temperatura es menor a los 90° C y comúnmente son solo aprovechados para usos directos como balneología y la calefacción.

### 1.3 Estudios para el aprovechamiento de la energía geotérmica

El procedimiento en la actualidad que permite de forma técnica y económica disponer de la energía geotérmica es extrayendo el agua caliente o en fase de vapor contenida en los yacimiento hidrotermales. El procedimiento de localizar los yacimientos energéticamente y económicamente viables consiste en una serie de etapas en las que ciencias como la geología y geofísica juegan un papel importante (Secretaría de Energía Argentina, 2015).

#### *Reconocimiento*

La primera etapa consiste en la realización de estudios con métodos superficiales con el objetivo de detectar las zonas con mejores condiciones para su exploración; normalmente se explora sobre áreas de más de 10,000 km<sup>2</sup>. En esta etapa, la Geología se encargaría de realizar estudios acerca de la procedencia del tipo de roca que se localice en la zona donde se considera explorar y paralelamente la Geoquímica realiza estudios sobre la composición de las rocas para identificar los minerales que la componen e inferir si la zona tiene condiciones químicas y geotérmicas.

#### *Prefactibilidad*

En la segunda etapa, el rango de estudio se reduce entre los 500 y 2,000 km<sup>2</sup> y consiste en determinar las características del yacimiento geotérmico para determinar la ubicación de pozos de exploración. La Geofísica se encarga en esta etapa, mediante estudios de resistividad eléctrica, obtener un mapeo preliminar de la distribución del subsuelo y poder ubicar las posibles zonas donde se encuentren algún yacimiento geotérmico. El mapeo se realiza proporcionando una corriente eléctrica directamente al subsuelo midiendo las diferencias de potencial con la superficie, las zonas de menor resistividad pueden indicar presencia de agua.

#### *Factibilidad*

La tercera etapa consiste en verificar la posibilidad técnica y económica de aprovechamiento del yacimiento, definiendo los pozos de explotación.

#### *Desarrollo*

La cuarta etapa tiene como objetivo realizar el proceso de perforación de los pozos y evaluarlos para identificar a los pozos productores. Así también se realiza el diseño conceptual de la central geotermoeléctrica.



## 1. Energía Geotérmica y su aprovechamiento

### Explotación

La última etapa se enfoca en la implementación de la central geotermoeléctrica, así como su operación acoplada con aquellos pozos productores. En la Tabla 1. 2 se observa en forma de resumen todas las etapas del proceso anteriormente presentadas.

Tabla 1. 2 Etapas para el aprovechamiento de la energía geotérmica (Secretaría de Energía Argentina, 2015).

Etapas del proceso de explotación de Geotérmia.					
	Reconocimiento	Prefactibilidad	Factibilidad	Desarrollo	Explotación
Área de estudio	>10,000 km <sup>2</sup>	500 >2,000 km <sup>2</sup>	10 > 15 km <sup>2</sup>		
Objetivos	Detectar zonas con potencial geotérmico mediante métodos superficiales.	Determinación de características del yacimiento geotérmico y ubicar pozos de explotación.	Evaluación de factibilidad de los pozos de explotación.	Perforación y evaluación de pozos. Diseño conceptual de la central.	Implementación y funcionamiento de la central geotérmica.

### 1.4 Energías renovables en México y en el mundo

Las energías renovables son aquellas que no consumen sus recursos o en otras palabras, al aprovechar sus fuentes energéticas, sus potenciales no se ven disminuidos. También se dice que son fuentes “inagotables”, esto tomando en cuenta una escala de tiempo humana. Generalmente tienen un bajo impacto ambiental en su entorno, y son una alternativa para ayudar a cubrir las necesidades energéticas, pero aún no ha sido posible competir con las fuentes de energías convencionales (Díaz, 2015).

Existe un creciente compromiso mundial por reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y esto será posible con la participación de fuentes de energía renovables en el área industrial. Las políticas en materia de energía, hoy en día están favoreciendo a la disminución de contaminantes mediante incrementar impuestos en las emisiones provenientes de combustibles fósiles. La generación de energía eléctrica se ubica como el segundo emisor de CO<sub>2</sub> y que aumenta conforme la demanda (SENER, 2015).

A nivel mundial las energías renovables tienen una participación del 22.8% de la generación eléctrica, donde la participación de la energía hidráulica es la mayor. En la Ilustración 1. 2 se puede observar el dominio que aún presenta el uso de las fuentes de quema de combustibles sin embargo, la prospección del uso de energía renovables es ascendente debido a la actual concientización sobre los problemas que ha ocasionado el cambio climático y crear oportunidades para proporcionar energía eléctrica a las millones de personas que no cuentan con este servicio aún (REN21, 2015).



## 1. Energía Geotérmica y su aprovechamiento

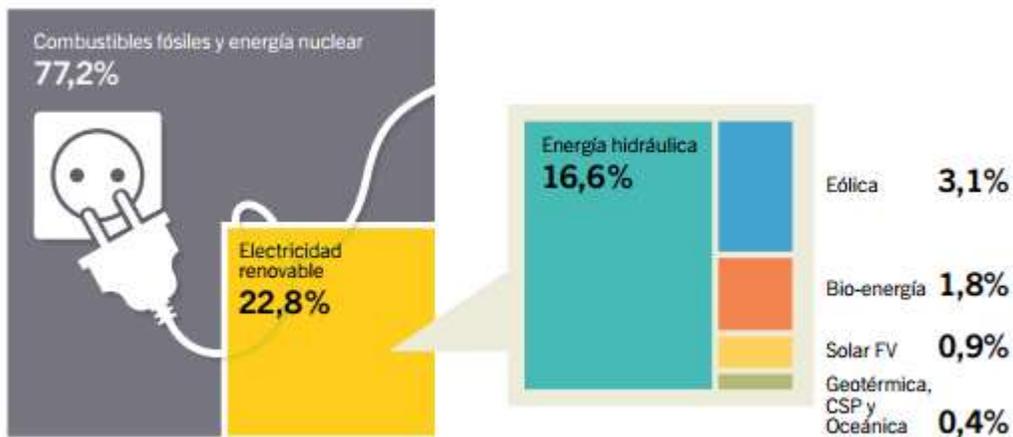


Ilustración 1. 2 Participación estimada de fuentes de energía en la producción mundial (REN21, 2015).

En México los combustibles fósiles han sido la base para el desarrollo nacional. Los pronósticos indican que seguirán ocupando una participación destacada como fuente primaria de energía para las próximas décadas sin embargo, estos recursos se están agotando, por lo que es importante diversificar las fuentes de energía para poder atender las necesidades del país.

Existe un gran potencial de fuentes de energía renovables en el país, cuenta con zonas de altos niveles de radiación, recursos hidráulicos para la instalación de plantas minihidráulicas, vapor y agua para el desarrollo de campos geotérmicos, zonas con intensos y constantes vientos, importantes cantidades de desperdicios orgánicos proveniente de las ciudades y esto solo por mencionar algunos (SENER, 2012). El uso en el país de energías renovables pueden impulsar el abastecimiento de energía eléctrica a aquellas comunidades que no tienen acceso a la red eléctrica nacional y representa una alternativa económicamente viable para su implementación.

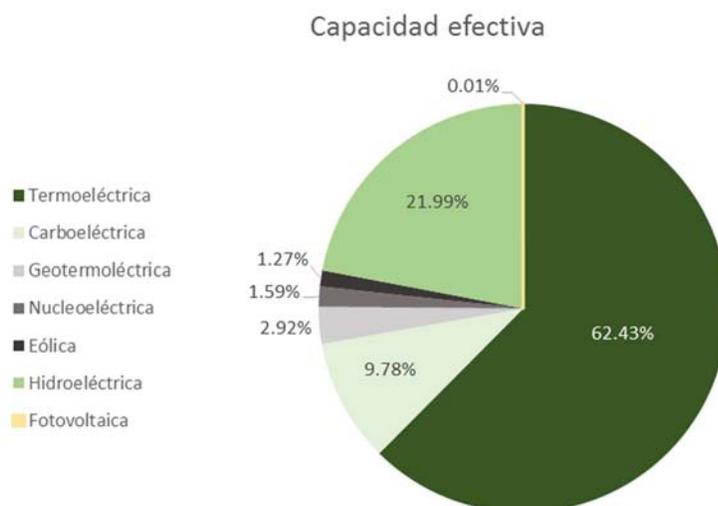


Ilustración 1. 3 Capacidad efectiva en México por tecnología, Marzo (SENER, 2016).



1. Energía Geotérmica y su aprovechamiento

La aportación de energías renovables en la capacidad efectiva en el país representa el 27.8% (Ilustración 1. 3), esto sin tomar en cuenta la biomasa. La generación por las plantas hidroeléctricas tiene la mayor aportación con un 22% y con la menor aportación la fotovoltaica. A pesar de los grandes esfuerzos por disminuir el uso de combustibles fósiles aún representa el 72.21 % (SENER, 2016).

Tabla 1. 3 Generación bruta y capacidad efectiva en energías renovables en México, Marzo (SENER, 2016).

Tecnología	Generación bruta [MWh]	Capacidad efectiva [MW]
Geotermolétrica	478,882.13	1,608.00
Nucleoeléctrica	256,338.81	873.60
Eólica	150,580.38	699.15
CFE	12,116.31	86.30
PIE	138,464.07	612.85
Hidroeléctrica	2,466,673.23	12,092.36
Fotovoltaica	1,116.03	6.00
<b>Total</b>	<b>3,504,170.96</b>	<b>15,978.26</b>

En forma cuantitativa, la capacidad efectiva para la generación de energía eléctrica a través de fuentes renovables es de 15,978 MW y una generación bruta de 3, 504,170 MWh tal como se muestra en la Tabla 1. 3. La tecnología que tiene mayor generación y capacidad es la hidráulica seguida por la energía geotérmica. En el caso de la energía eólica, la aportación que tienen los productores independientes de energía (PIE) es en mayor proporción que lo que aporta la CFE.

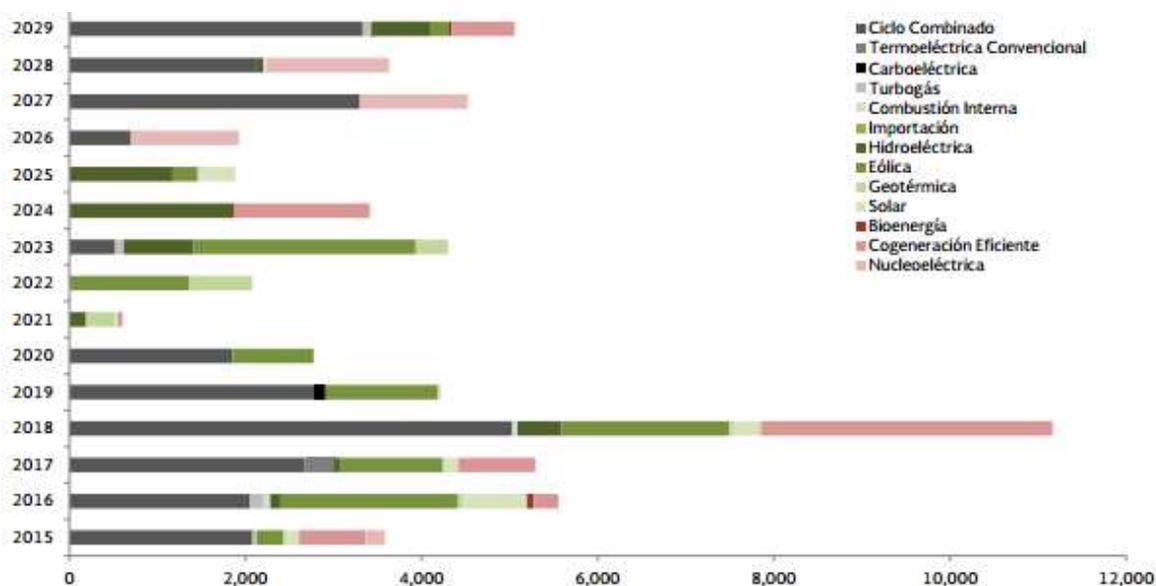


Ilustración 1. 4 Adición de capacidad por tecnología, 2015 – 2029 (SENER, 2015)



Para satisfacer la demanda del período 2015 – 2029, se prevé que se requerirá de 59,985.6 MW de capacidad instalada adicional de los cuales el 54.3% serán por energías limpias y el restante 45.7% empleando combustibles fósiles. En la Ilustración 1. 4 se muestra la evolución por tecnología que se prevé exista en el período mencionado donde la mayor aportación a la capacidad a instalar se observa en el año 2018 será por parte de plantas de ciclo combinado. En los años 2021, 2024, 2025 se pronostica solo la adición de fuentes limpias como la hidroeléctrica, geotermia, solar (SENER, 2015).

### 1.5 La geotermia como energía renovable

Existen ciertas desventajas en la explotación de algunas energías renovables y la principal es que su fuente es intermitente, como es el caso de la energía eólica que depende de los factores climáticos; la energía solar solo se puede aprovechar en el día y también depende del clima, razones por lo que actualmente no es una opción atractiva para la inversión privada.

En lo que respecta a la energía geotérmica es un recurso “inagotable”, a pesar de que el núcleo terrestre se encuentra en una etapa de enfriamiento a un ritmo lento por ello se dice que es un recurso ilimitado a una escala de tiempo humana y lo podríamos aprovechar miles de años. Se ve beneficiada al no depender de factores climatológicos ni a las estaciones del año y por tanto es una atractiva opción para la generación de energía eléctrica al tener un factor de planta alto. El medio de transporte de la energía geotérmica de manera natural se hace a través del agua que se encuentra contenida en los mantos acuíferos y que se recuperan cada vez que hay precipitaciones, de modo que el mismo yacimiento geotérmico es un sistema sustentable.

Una de las desventajas del uso de la energía geotérmica es que en el proceso de exploración y explotación, hay un impacto ambiental en las zonas aledañas, causando daño a la flora y fauna. También se puede presentar un impacto en los mantos acuíferos si no hay un control en la regulación de volumen de agua extraído con respecto al reinyectado, provocando problemas de erosión en la zona. En la fase de Desarrollo que comprende la perforación de pozos, en la mayoría de casos para lograr ubicar un pozo productor es una tarea difícil y costosa, es por lo que la inversión se considera capital de riesgo.

En la Ilustración 1. 5 se muestra un diagrama de modo de resumen y adicionando algunas ventajas y desventajas que presenta la energía geotérmica.

## 1. Energía Geotérmica y su aprovechamiento

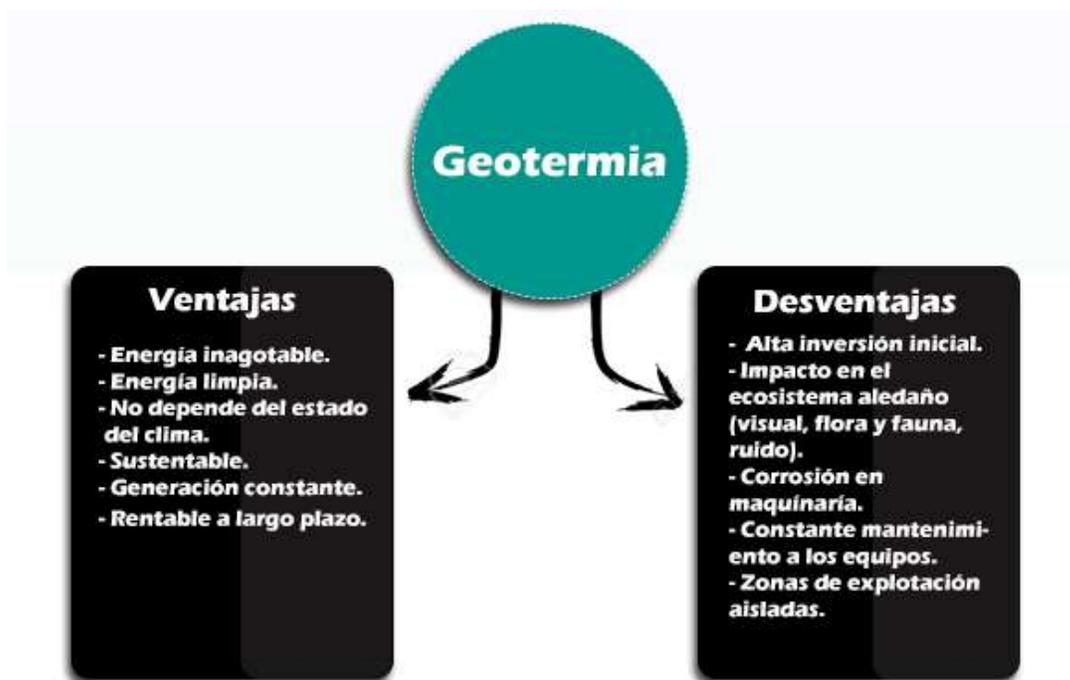


Ilustración 1. 5 Ventajas y desventajas del uso de la energía geotérmica.

### 1.6 Usos directos con geotermia

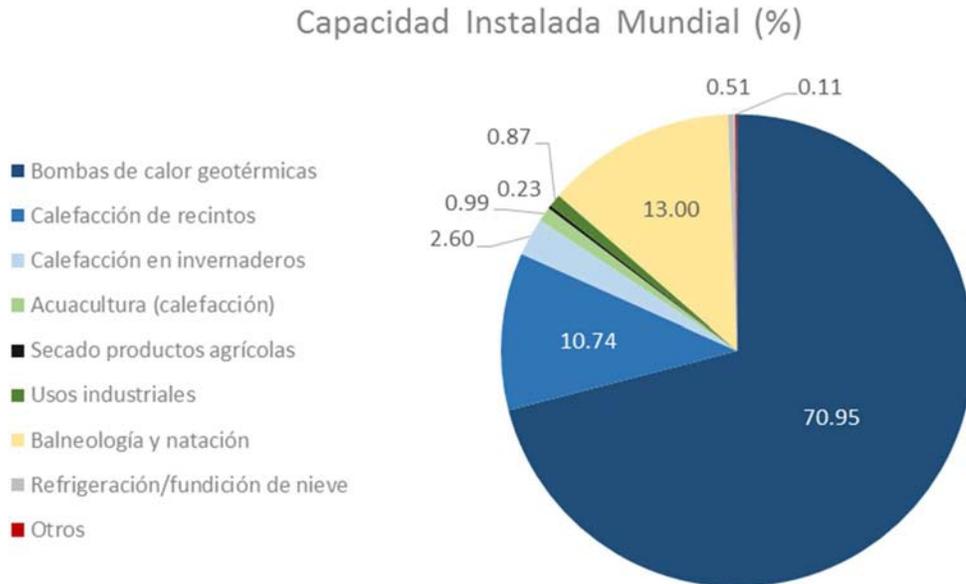
En la antigüedad la energía geotérmica fue aprovechada en el área de la higiene. Un ejemplo de ello fue en los baños públicos y privados llamados *termas griegas y romanas* donde contaban con baños de vapor y piscinas mixtas de agua caliente, templada y fría. También durante el Renacimiento en los siglos XVIII y XIX se tienen registros de la utilización del agua termal como medida de higiene (Ramos Castellanos, 2010).

La capacidad instalada total mundial para usos directos en el año 2014 se reportó de 70,329 MWt y con un uso total anual de 163,287 GWh (W. Lund & L. Boyd, 2015). El uso que ha tenido mayor auge actualmente han sido las bombas de calor geotérmicas destinadas para la calefacción de espacios y refrigeración de alimentos y los países que tienen la mayor capacidad instalada de estos dispositivos son Estados Unidos, China, Suecia, Alemania y Francia.

En la Ilustración 1. 6 se muestra el porcentaje de capacidad instalada mundial, los datos de este estudio se realizaron tomando en cuenta 82 países que utilizan energía geotérmica para usos directos incluyendo México. Las bombas de calor geotérmicas tienen la mayor capacidad instalada con un valor de 49,898 MWt que representa el 70.95 %, en segundo lugar está colocada la balneología y natación con una capacidad de 9,140 MWt donde la mayoría de los países cuentan con este uso con fines recreativos y terapéuticos. En menor valor se encuentra los usos industriales donde su operación es continua durante el año con



una capacidad de 610 MWt que representa un 0.87%. Un par de ejemplos de esta categoría es el embotellamiento de agua y refrescos llevado a cabo en países como Bulgaria, Serbia y Estados Unidos; el segundo ejemplo es el procesamiento de pulpa para fabricación de papel llevado a cabo en Nueva Zelanda.

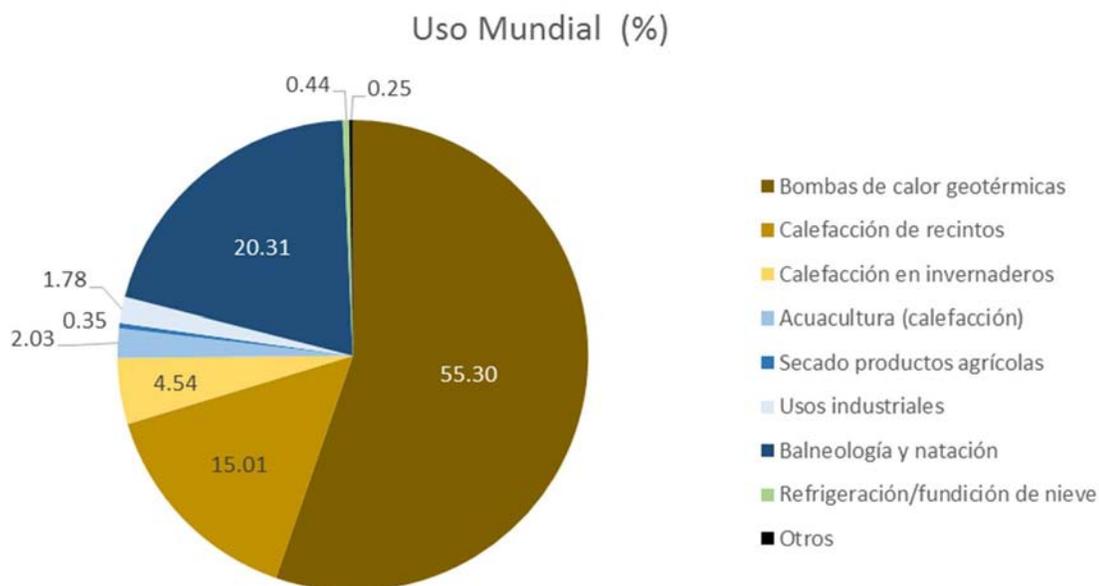


*Ilustración 1. 6 Capacidad instalada mundial para usos directos (W. Lund & L. Boyd, 2015).*

En la Ilustración 1. 7 se observar el porcentaje de uso mundial de la energía geotérmica en los mismos usos directos antes citados. Para el caso de las bombas de calor se utilizaron 325,025 TJ/año que representa un 55.30%; la balneología y natación tuvo una utilización de 119,381 TJ/año y con una menor utilización se encuentra la categoría de otros con un valor de 1,452 TJ/año donde incluye la cría de ganado, cultivo de espirulina, la desalinización y la esterilización de botellas. En Nueva Zelanda se encuentra la mayor utilización dirigida al riego y protección de cultivos contra heladas.

Para el caso de México, la mayor utilización de la energía geotérmica se destina para la generación de energía eléctrica. Para usos directos dispone de una capacidad instalada de 155.82 MWt que está destinada casi en su totalidad para balneología. Otros usos que se encuentran en desarrollo y en menor escala con ubicación en el campo geotérmico Los Azufres son el secado de pieles, deshidratación de alimentos y sistemas de calefacción de este modo su uso tuvo un valor de 4,171 TJ/año (W. Lund & L. Boyd, 2015).

## 1. Energía Geotérmica y su aprovechamiento



*Ilustración 1. 7 Utilización mundial en usos directos de geotermia (W. Lund & L. Boyd, 2015).*

El Grupo IIDEA del Instituto de Ingeniería desarrolla proyectos de investigación para impulsar los usos directos con energía geotérmica. En su línea de investigación se encuentra la deshidratación de alimentos como una medida de conservación y consumo de alimentos y la desalación de agua de mar a través de sistemas modulares.

### 1.7 Generación de energía eléctrica con energía geotérmica

El aprovechamiento de energía Geotérmica para la generación de energía eléctrica involucra altos costos de inversión en exploración, perforación y construcción de la central eléctrica. Los costos de inversión se estiman desde los US \$3,800/kW y los costos de la electricidad generada de entre los 4 – 7 US¢/kW. Para las aplicaciones térmicas de los recursos geotérmicos, sus costos son de entre los 0.5 – 2 US¢/kW (Alatorre Frenk, 2009).

La explotación por primera vez en México tuvo su aparición en Pathé, Hidalgo y que debido a su primeros resultados de factibilidad se decidió instalar una planta piloto de 3.5 MWe, la cual inició su operación en 1959. Pathé contaba con 17 pozos y se mantuvo en operación hasta 1973 (Arellano, et al., 2008).

La generación de energía eléctrica de tipo comercial en México se inició con el proyecto Cerro Prieto I de 30 MW implementado por la CFE en 1973. Su crecimiento ha continuado y a la fecha se tienen una capacidad instalada de 1,017.4 MWe distribuido en cuatro centrales geotermoeléctricas tal como se muestra en la Tabla 1. 4.



Tabla 1. 4 Capacidad instalada en México (Gutiérrez Negrín, 2015)

Localidad	Capacidad instalada [MWe]	Generación total [MWe]
Cerro Prieto	720	570
Los Azufres	194	191
Los Humeros	93.4	68.4
Las Tres Vírgenes	10	10
<b>Total</b>	<b>1017.4</b>	<b>839.4</b>

Cerro Prieto se localiza en Baja California y es el campo geotérmico más grande del mundo y su operación ha sido de las más exitosas. Cuenta con 300 pozos con profundidades entre los 700 y 4,300 m explotados en cuatro centrales. Los Azufres está localizado en el estado de Michoacán y en el año de 1977 se perforaron los primeros pozos productores. Cuenta con más de 80 pozos con profundidades de entre 660 y 3,544 m con una temperatura de fondo de 358°C. Los Humeros están localizados en el estado de Puebla y en el año de 1990 se inició la explotación comercial del campo y dispone de 40 pozos. Las Tres Vírgenes se ubican en Baja California Sur y es el campo que cuenta con la menor capacidad instalada. En 1986 se perforó el primer pozo y abastece a ciudades aledañas como Santa Rosalía (Arellano, et al., 2008).

El Inventario Nacional de Energía Renovables presenta un mapa del potencial geotérmico (Ilustración 1. 8) calculado con base en el censo de más de 1,300 focos termales realizado por la CFE, mediante la determinación analítica de parámetros químicos como la presencia de sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruros, sulfuros, sílice, etc., que son datos necesarios para determinar el origen y clasificación del recurso geotérmico, así como un indicativo de las temperaturas probables en el subsuelo (SENER, 2013).

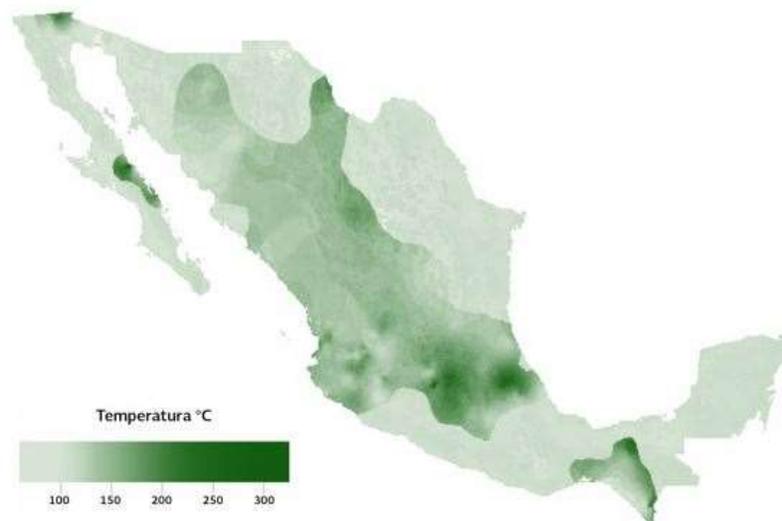


Ilustración 1. 8 Mapa del potencial de los recursos geotérmicos en México (SENER, 2013)



## 1. Energía Geotérmica y su aprovechamiento

Se ha estimado que en el país existen reservas equivalentes a los 106.44 TW clasificadas se la siguiente manera mediante un análisis probabilístico (Montecarlo) del método volumétrico (SENER, 2013):

- Reservas posibles: aquellas que por sus manifestaciones termales en la superficie y por su geología permiten inferir la posibilidad de un recurso geotérmico. Para este tipo de reservas se estima un potencial de 7,423 MWe.
- Reservas probables: aquellas en las que se han hecho suficientes estudios de geofísica y geoquímica, para delimitar la probable extensión y temperatura de la zona geotérmica. Estas reservas se estiman con un potencial de 2,077 MWe.
- Reservas probadas: aquellas en las que los estudios y las pruebas de pozos permiten recomendar la instalación de una planta geotermoeléctrica. Para estas reservas se estima un potencial de 1,144 MWe que incluye las zonas de Cerro Prieto, Los Azufres, Los Humeros y Cerritos Coloraditos (SENER, 2013).

La Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de CFE es la responsable de aprovechar y explotar estos recursos y como parte de la estrategia de la CFE para incrementar la generación de energía eléctrica mediante fuentes no convencionales, cuenta con la prospección mostrada en la Tabla 1. 5 para la implementación en los campos geotérmicos existentes.

Tabla 1. 5 Proyectos para la explotación de recursos geotérmicos CFE (SENER, 2013)

Proyecto	Los Azufres III Fase I	Los Humeros III Fase A	Ciclo Binario Tres Vírgenes	Los Humeros III Fase B	Los Azufres	Cerritos Colorados
Capacidad (MW)	50	25	1.7	25	25	25
Estado	Construcción	Adjudicado	Proyecto	Proyecto	Proyecto	Proyecto
Operación	Dic. 2014	Sep. 2015	2016	2018	2018	2019
Localización	Michoacán	Puebla	Baja California Sur	Puebla	Michoacán.	Jalisco

## Conclusión

La Tierra contiene un gran potencial energético y podría contribuir en la disminución de la dependencia de las formas convencionales de conseguir energía en forma de calor para sus diversos usos. La energía geotérmica, no contribuye a los problemas ambientales que enfrenta hoy en día el planeta y es por ello que se vuelve una atractiva opción, aparte de que es un recurso renovable. El uso de energías limpias y renovables deberá tomar mayor importancia para los siguientes años tanto por el incremento de la demanda energética como por los problemas del efecto invernadero, esto trae consigo una prospección positiva para la geotermia.



## 1. Energía Geotérmica y su aprovechamiento

México cuenta con un importante potencial Geotérmico y en específico, cuenta con grandes cantidades de recursos de baja y media entalpía que hasta el momento no han sido aprovechados para usos industriales, y el poco uso se ha destinado a la balneología, por lo que es importante crear procesos industriales que se acoplen a las condiciones de dichos recursos y de esta manera presentar una factible, viable y eficiente utilización de la energía.





## 2. Ciclo Binario de Evaporación Instantánea (CBEI)

### Introducción

Los diversos usos que se le ha asignado al aprovechamiento de la energía geotérmica desde su descubrimiento han sido en usos directos como es el caso de la balneología. Actualmente ha incrementado el uso de ésta en la generación de energía eléctrica que se ha convertido en una de las necesidades básicas a cubrir para el ser humano y la demanda va en constante crecimiento a razón que incrementa la población.

La transformación de energía térmica a eléctrica se lleva a cabo por medio de un conjunto de dispositivo que constituyen a un ciclo de potencia en el que opera un fluido de trabajo que se encarga de transportar la energía para su conversión. El cambio de tipo de energía siempre tendrá pérdidas significativas por la operación, sin embargo, con un adecuado diseño del ciclo se podría obtener un buen desempeño.

Existen diversos tipos de ciclos de potencia para la explotación de energía geotérmica. El ciclo más simple es llamado ciclo a contrapresión, donde la descarga del flujo saliente de la turbina se hace al ambiente y se utiliza generalmente en plantas pilotos. En contraste, el ciclo que tiene una mayor complejidad es el ciclo Kalina que utiliza una mezcla de sustancias, generalmente agua con amoníaco, donde los procesos de cambio de fase se llevan a cabo a una temperatura variable, a esto se le conoce como mezcla azeotrópica y beneficia al aprovechar mejor la fuente de calor y hacer más eficiente el ciclo.

El antecedente del Ciclo Binario de Evaporación Instantánea (CBEI) proviene del primer planteamiento de un ciclo binario llamado "PWG" (*Pressure Water Generation*) por el grupo IMPULSA IV del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. El nombre se le asignó con base en su principio de funcionamiento, el cual se diseñó para trabajar con agua. El CBEI retoma el principio de operación del PWG, a cargo del Grupo IIDEA actualmente, que en esencia es una modificación de un ciclo binario convencional donde la diferencia se presenta en el sistema de generación de vapor.

El CBEI está diseñado para explotar yacimientos de baja y media entalpía los cuales, como ya se ha mencionado, se utilizan principalmente en usos directos debido a su bajo potencial térmico. De esta manera se pretende impulsar la explotación de estos recursos para usos industriales y ofrecer alternativas para la generación de energía eléctrica.





## 2.1 Ciclos de potencia

Un ciclo de potencia es una máquina térmica que mediante un conjunto de dispositivos transforman un flujo de calor en trabajo mecánico de forma continua. Se requiere de un sumidero de alta temperatura para suministrar el flujo de calor y un sumidero de baja temperatura para descargar el calor remanente. Estos ciclos hacen uso de un fluido de trabajo para su operación (Mario Invernizzi, 2013). Son utilizados en centrales eléctricas que acoplado un generador obtienen energía eléctrica para su distribución.

### Ciclo a contrapresión

El ciclo a contrapresión o también conocido como *back-pressure* es el más simple de todos los ciclos de potencia utilizados en campos geotérmicos y por lo cual su inversión inicial es baja en comparación a los demás. Aprovecha directamente el fluido geotérmico de yacimientos secos o también de yacimientos húmedos que después de que pasa por un separador de flujos, direcciona el vapor hacia la turbina, genera trabajo y después se libera al ambiente. La descarga se realiza a la atmósfera mediante un silenciador y esto impacta a la eficiencia del ciclo al obtenerse un menor trabajo en la turbina. Necesita de grandes cantidades de caudal de fluido geotérmico del orden de 12 t/h para generar 1 kW.

En campo, estas plantas también son llamadas plantas a boca de pozo, porque se instalan en la periferia del pozo productor y son utilizadas para evaluar el potencial del campo geotérmico debido a su bajo costo y fácil instalación (Hiriart, 2011).

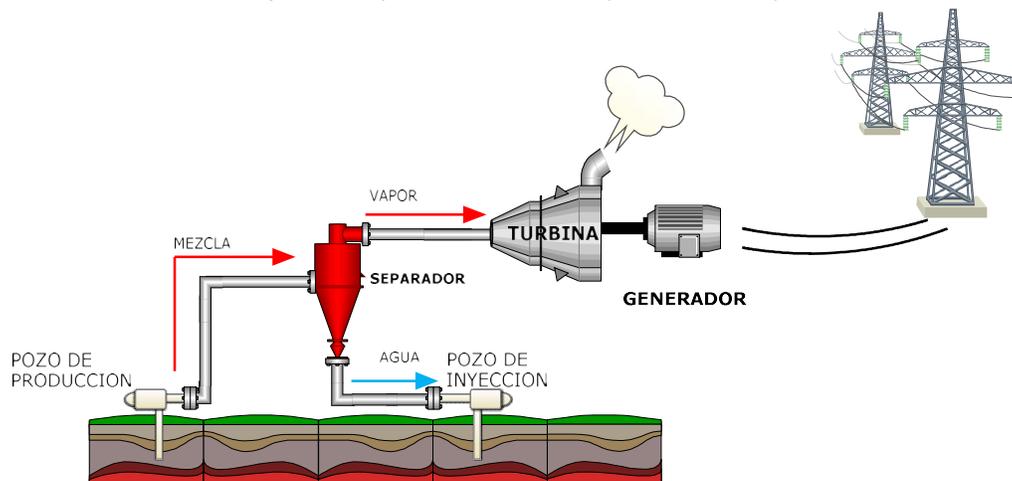


Ilustración 2. 1 Ciclo a contrapresión (Aviña, 2015).

## Ciclo a condensación

En este ciclo también se utiliza directamente el fluido geotérmico pero se acopla un sistema de enfriamiento para su recuperación y su posterior reinyección al pozo. Presenta la ventaja de incrementar la eficiencia del ciclo al tener la descarga de la turbina a una presión menor a la presión atmosférica, pero su inversión inicial también incrementa al adicionar el sistema de enfriamiento. Se requiere de 7 t/h para producir 1 kW, un poco más de la mitad de lo que se utilizaría en una planta a contrapresión. Generalmente se instalan cuando ya se conocen las características del campo geotérmico (Hiriart, 2011).

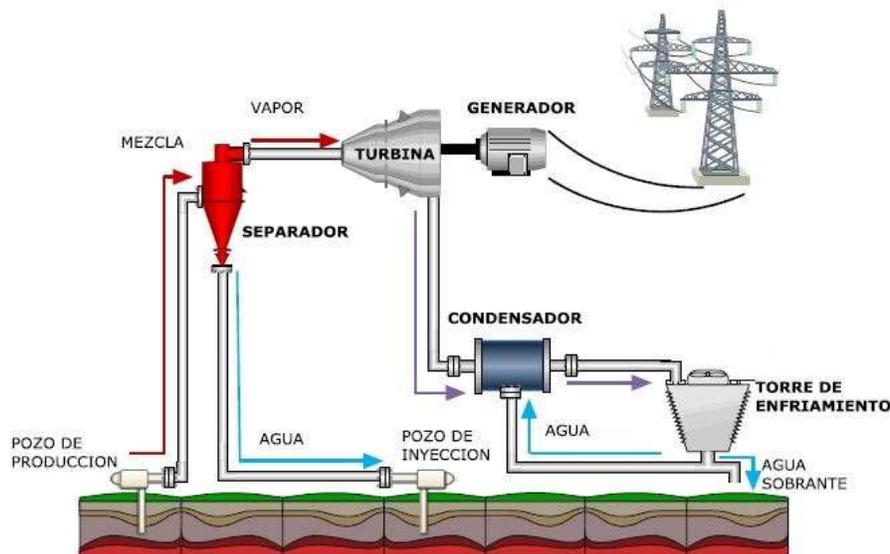


Ilustración 2. 2 Ciclo a condensación (Aviña, 2015).

## Ciclo a condensación con “flash”

Este ciclo es una extensión del ciclo a condensación simple pero tiene la diferencia de adicionar un dispositivo *flash* que tiene como objetivo una disminución súbita de la presión del fluido geotérmico consiguiendo un flujo bifásico que se introduce en un separador y direccionar los flujos.

Los dispositivos con el que se consigue el *flasheo* pueden ser válvulas de compuerta o placas orificio que son comúnmente utilizadas en centrales geotermoeléctricas. El *flasheo* se puede llevar a cabo en más de una etapa, tantas como lo permita las condiciones de temperatura del fluido y así conseguir un máximo aprovechamiento de la energía. Los flujos de vapor de alta y baja presión provenientes de las etapas, se suministran en una turbina a pasos. Comúnmente sólo se utiliza un *flasheo* en las centrales Geotermoeléctricas, pero existen casos que llegan hasta las tres etapas, países como Nueva Zelanda y Estados Unidos son los que actualmente cuentan con este tipo de plantas (Bertani, 2015).



## Ciclo Binario

Este tipo de ciclo basa su principio de funcionamiento en el Ciclo Rankine Simple que utiliza vapor de agua para su operación y que comúnmente son acoplados a Ciclos Brayton (ciclo de gas). Este acoplamiento es denominado Ciclo Combinado.

El ciclo binario utiliza dos fluidos de trabajo para su operación. Enfocado en el área de la geotermia, el fluido geotérmico se introduce en un intercambiador de calor que generalmente es uno del tipo tubo y coraza, para efectuar la transferencia de calor al fluido de trabajo del ciclo. El beneficio que se tiene en este tipo de ciclo es que se evita el contacto del fluido geotérmico en los equipos y en específico en la turbina, evitando así problemas de corrosión e incrustaciones debido a los altos contenidos de minerales en el fluido geotérmico.

Generalmente estos ciclos binarios utilizan fluidos orgánicos, razón por lo que son denominados como Ciclos Rankine Orgánicos o también conocidos como *ORC* por sus siglas en inglés y han tenido una inclusión en la explotación de energías renovables como es el caso de la energía geotérmica y solar. Las principales características de los fluidos orgánicos son tienen un bajo punto de ebullición, alto peso molecular y tiene un buen desempeño en el transporte de energía permitiendo un mejor aprovechamiento de la energía de la fuente de calor. Su origen data a finales del siglo XIX con la necesidad de sustituir al agua y generar vapor a alta presión con una fuente de calor de baja temperatura. El rango de temperaturas apropiado para utilizar este tipo de ciclo es entre 85 y 180 °C explotando energía geotérmica, a temperaturas mayores es preferible utilizar agua como fluido de trabajo por presentar mejor desempeño (Hiriart, 2011).

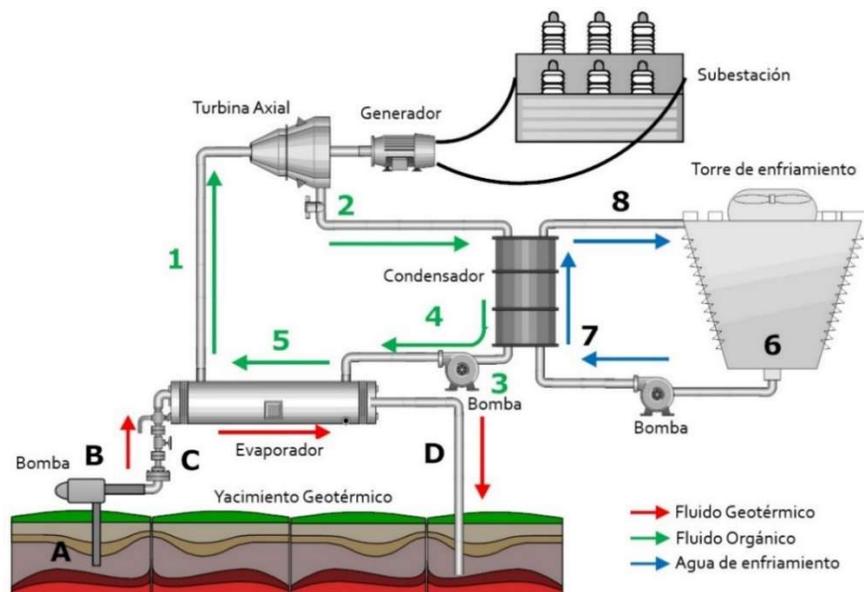


Ilustración 2. 3 Ciclo binario (Aviña, 2015)



En la tabla Tabla 2. 1 se muestran las ventajas y desventajas del *ORC*. La ventaja más significativa en los *ORC* es que pueden explotar fuentes de calor de baja temperatura. Una desventaja es que la generación es baja, en el orden de unos cuantos MWe, comparando con las plantas convencionales que pueden llegar en el orden de cientos de MWe, como el caso de la central de ciclo combinado Taichung ubicada en Taiwán con una capacidad instalada de 5,788 MW. Esta planta cuenta con 10 turbinas de vapor de 550 MW cada una y 4 turbinas de gas de 72 MW (Power Technology, 2013).

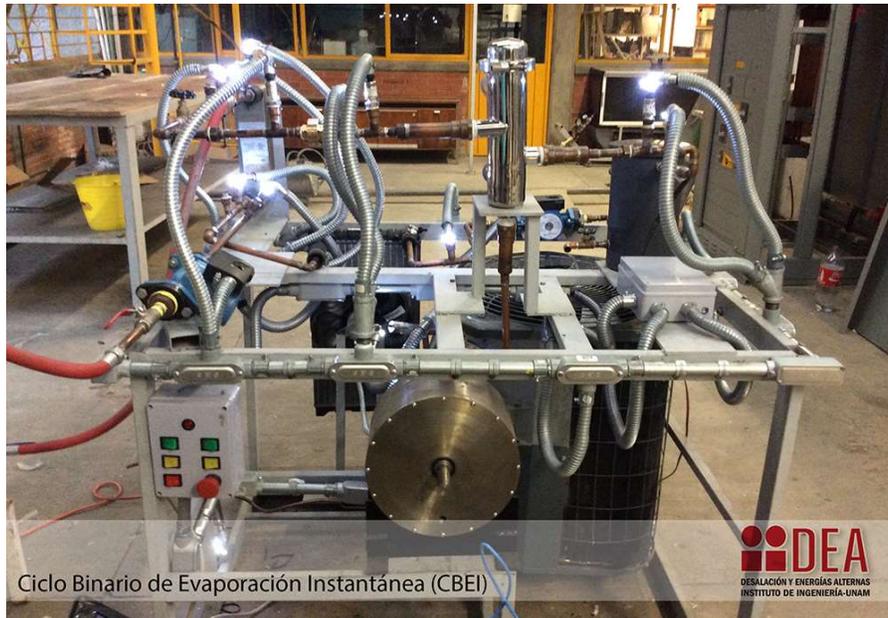
Tabla 2. 1 Ventajas y desventajas de los *ORC* (Quoilin, 2013)

Ventajas	Desventajas
Aprovechamiento de recursos de baja temperatura	Uso de sustancias peligrosas (tóxicas e inflamables)
Adaptación en el uso de energías renovables y calor remanente	Incremento en el costo por el fluido de trabajo
Configuración modular	Sustancias con impacto ambiental
Fácil instalación y transporte	Generación de potencia baja
Variedad de fluidos orgánicos	No supera el 24% de eficiencia térmica
Baja presión en el evaporador (< 30 bar)	El salto entálpico en la turbina es menor (menor generación de trabajo)
No hay presencia de condensado durante la expansión (fluidos secos e isentrópicos)	Baja temperatura crítica del fluido de trabajo, mayor consumo potencia en la bomba
Aumento de vida útil en la turbina	

## 2.2 Descripción general del CBEI

El CBEI es una modificación de un ciclo binario convencional donde su sistema de generación de vapor está compuesto por un intercambiador de calor de placas planas, un dispositivo de estrangulamiento y un separador centrífugo, a diferencia de los convencionales donde su sistema de evaporación es un intercambiador de tubo y coraza. Tiene como objetivo la explotación de yacimientos de media y baja entalpia los cuales no superan los 150 °C y su diseño está hecho para tener una generación de 10 kW.

La principal problemática de utilizar recursos geotérmicos es que tienen alto contenido de minerales que causan problemas de corrosión e incrustaciones en los equipos, es por ello que se requiere de dispositivos de manteniendo sencillo. La ventaja que presenta la modificación en el CBEI es que precisamente en el intercambiador de calor de placas, sus mantenimientos son más sencillos en comparación con los implementados en uno del tipo tubo y coraza. Otra ventaja importante es que al utilizar un fluido orgánico y el efecto *flash*, hace posible el aprovechamiento de recursos de baja temperatura.



Ciclo Binario de Evaporación Instantánea (CBEI)



Ilustración 2. 4 Prototipo del Ciclo Binario de Evaporación Instantánea (CBEI)

### Principio de funcionamiento

En la Ilustración 2. 5 se presenta un diagrama del CBEI. La configuración física cuenta con tres sistemas principales para su operación y son los siguientes:

- Sistema de generación de vapor. El fluido geotérmico extraído del yacimiento es transportado al intercambiador de calor para transferir su energía al fluido de trabajo del ciclo. El fluido de trabajo es llevado a condiciones de saturación y cuando pasa a través del dispositivo de estrangulamiento se origina el efecto *flash* donde una fracción del flujo se evapora y la otra permanece líquida. El flujo bifásico se introduce al separador para direccionar el vapor a la turbina y el líquido a un mezclador para posterior utilización.
- Sistema de generación de energía eléctrica. El vapor que se introduce en la turbina es expandido produciendo trabajo mecánico y el flujo saliente se direcciona a un condensador. La turbina está acoplada a un generador eléctrico donde el trabajo mecánico se transforma en energía eléctrica.
- Sistema de enfriamiento. Al flujo saliente de la turbina se le extrae su energía en un condensador y ya en fase líquida es enviado al mezclador para unirse al flujo proveniente del separador. El proceso de condensación se lleva a cabo a una presión inferior a la presión atmosférica y este valor depende del tipo de condensador y fluido de enfriamiento a utilizarse.

2. Ciclo Binario de Evaporación Instantánea

2.3 Análisis termodinámico

El CBEI esquemáticamente se muestra en la Ilustración 2. 5 indicando cada uno de sus estados termodinámicos para su análisis.

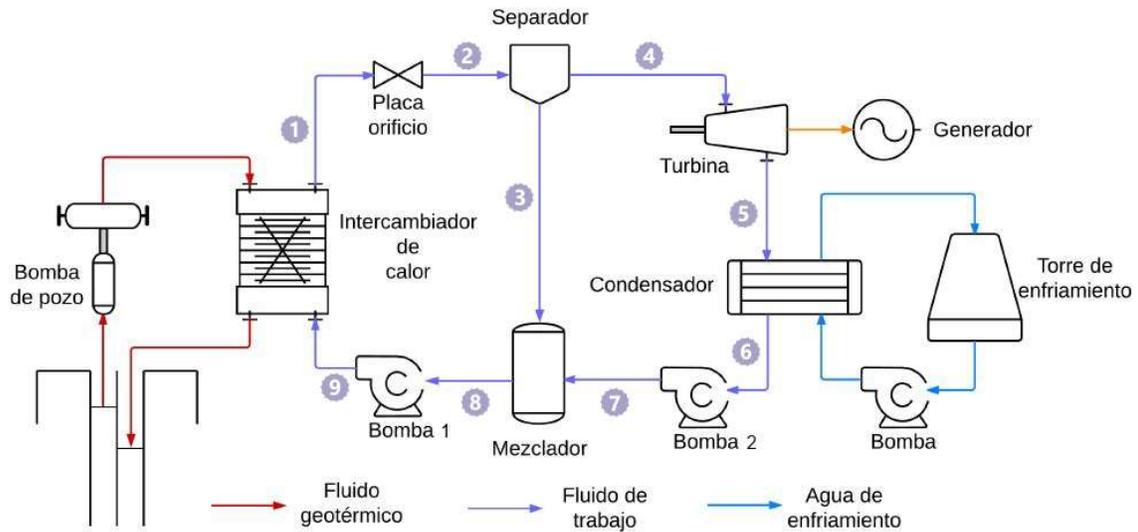


Ilustración 2. 5 Diagrama del CBEI. (Benítez Torreblanca, 2015)

En la Ilustración 2. 6 se muestra el diagrama temperatura – entropía del CBEI con sus correspondientes estados termodinámicos tanto teóricos, marcados con una letra “s”, como los estados reales que contemplan las eficiencias isentrópicas de los equipos.

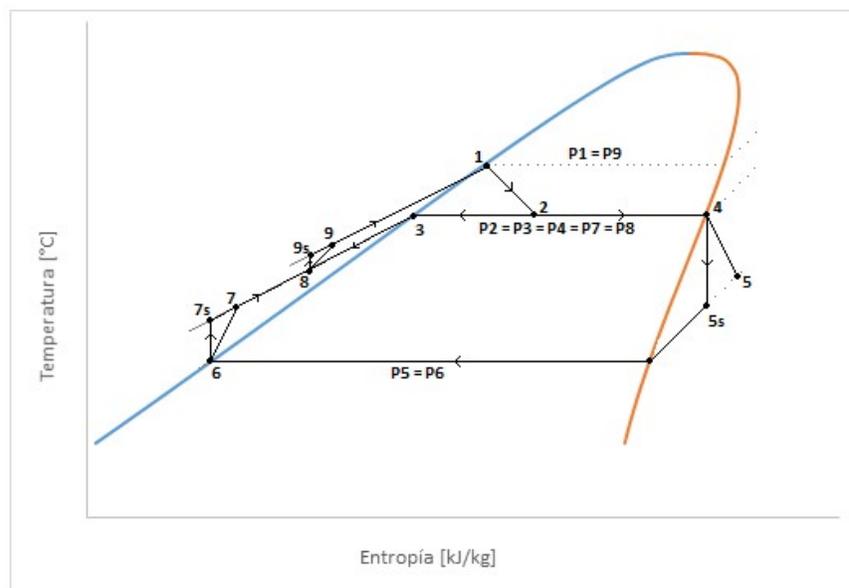


Ilustración 2. 6 Diagrama T-S del CBEI (Russell, 2016)



## Balance de energía

Definiendo los estados termodinámicos para su análisis siguiendo los diagramas de la Ilustración 2. 5 y la Ilustración 2. 6.

- Proceso 9-1: Se lleva a cabo el intercambio de calor entre el fluido geotérmico y el fluido de trabajo a presión constante (proceso isobárico). El fluido de trabajo llega a condiciones de saturación y realizando el balance de energía se llega a la expresión (2.0) del calor de entrada ( $\dot{Q}_{in}$ ).

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{FT}(h_1 - h_9) \quad (2.0)$$

- Proceso 1-2: Se produce una disminución súbita de la presión debido al cambio brusco de área generando el efecto "flash". Este proceso se lleva a cabo a entalpía constante (proceso isoentálpico).

$$h_1 = h_2 \quad (2.1)$$

- Proceso 2-3-4: La mezcla entra en un separador de flujos donde direcciona el vapor a la entrada de la turbina (4) y el líquido a un mezclador para su recuperación (3). En este proceso se mantiene la temperatura y la presión constante.

$$P_2 = P_3 = P_4 \quad (2.2)$$

$$T_2 = T_3 = T_4 \quad (2.3)$$

- Proceso 4-5: La fracción de vapor ( $x$ ) entra en la turbina donde se lleva a cabo un proceso de expansión y se realiza la conversión de energía. Este proceso idealmente se considera como isentrópico, pero añadiendo la eficiencia de la turbina y del generador, se obtiene las condiciones reales del proceso.

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{FT} x \eta_t \eta_g (h_4 - h_{5_s}) \quad (2.4)$$

Donde  $h_{5_s}$  es la entalpía específica a la salida de la turbina a condiciones ideales.

- Proceso 5-6: Por medio del sistema de enfriamiento se lleva a cabo el proceso de condensación del flujo saliente de la turbina. Este proceso se lleva a cabo a presión constante y el calor extraído ( $\dot{Q}_{out}$ ) se obtiene con la expresión (2.5).

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{FT} x (h_5 - h_6) \quad (2.5)$$



## 2. Ciclo Binario de Evaporación Instantánea

- Proceso 6-7: El líquido condensado es bombeado para su entrada en el mezclador donde se encuentra con el flujo extraído del estado 3. Este proceso también se lleva a cabo idealmente isentrópicamente pero añadiendo la eficiencia de la bomba obtenemos el trabajo real que consume.

$$\dot{W}_{B2} = \frac{\dot{m}_{FT} x (h_{7s} - h_6)}{\eta_b} \quad (2.6)$$

Para el caso de la bomba 1 se desarrolla de igual manera solo que en este caso la fracción del vapor condensado ( $x$ ) y la fracción del líquido separado ( $y$ ) se mezclan para conformar todo el fluido de trabajo que opera el ciclo.

$$\dot{W}_{B1} = \frac{\dot{m}_{FT} (h_{9s} - h_8)}{\eta_b} \quad (2.7)$$

- Proceso 3-7-8: La extracción del estado 3 ( $y$ ) y el vapor condensado ( $x$ ) se mezclan para conformar el flujo total del fluido de trabajo. Este proceso se lleva a cabo a condiciones de presión constante.

$$P_3 = P_7 = P_8 \quad (2.8)$$

$$x + y = 1 = \dot{m}_{FT} \quad (2.9)$$

## 2.4 Características de los equipos

### Intercambiador de calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo que facilita el intercambio de energía térmica entre dos fluidos que se encuentran a distintas temperaturas. La mayoría de los intercambiadores evitan la mezcla entre los fluidos, aunque existen necesidades específicas que requieren tanto una transferencia de energía térmica y de masa; estos últimos dispositivos se denominan cámaras de mezclado, donde las propiedades químicas de los fluidos generalmente se ven alteradas.

El intercambiador implementado en el CBEI es del tipo placas planas donde el recurso geotérmico no estará en contacto directo con los demás equipos del ciclo. El mantenimiento en este tipo de intercambiadores es más sencillo y de menor costo comparado con un intercambiador de tubo y coraza y es por lo que se propone utilizar debido a la problemática que existe de los altos contenidos de minerales en el recurso geotérmico que propicia problemas de corrosión e incrustaciones.



Las características técnicas principales en este equipo es un acercamiento de 3 °C y una caída de presión permisible de 3 bar. El arreglo de las placas es en U, con canales de fluido frio rodeados por canales de fluido caliente y de acero inoxidable 316L (Rodríguez, 2013).

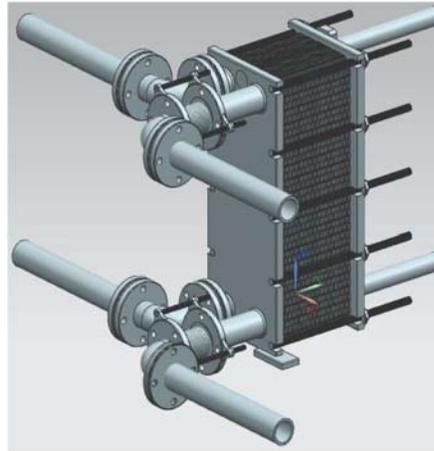


Ilustración 2. 7 Intercambiador de placas (Rodríguez, 2013)

### Placa orificio

- Como dispositivo de medición:

La medición de flujos es importante en la operación de cualquier sistema, ya que sin ésta no se podría llevar a cabo el balance de materia, control de la calidad y la operación se podría llevar a condiciones diferentes a las deseables.

Entre los instrumentos de medición, el que tiene mayores ventajas es la placa de orificio ya que tiene bajo costo, es de fácil aplicación e instalación, además de que se pueden tomar mediciones precisas, continuas y en tiempo real debido a que este dispositivo funciona a partir del principio de Bernoulli donde la variable a medir se obtiene indirectamente por medio de la caída de presión.

- Como dispositivo *flash*:

Cuando se está trabajando con un flujo bifásico o un flujo a condiciones de saturación, se puede obtener un porcentaje de vapor adicional acoplado un dispositivo de estrangulación. Esto se puede lograr mediante el fenómeno de la evaporación instantánea, se hace pasar el fluido a temperatura de saturación a través el dispositivo de estrangulamiento, como una placa de orificio o una válvula, a este fenómeno se le conoce como "*flasheo*". El fluido es despresurizado drásticamente y como consecuencia una fracción se evapora. El diámetro de la placa orificio varía dependiendo del requerimiento de la calidad de vapor o de las condiciones de la fuente de calor, aunque comúnmente se selecciona el dispositivo a prueba y error.

## 2. Ciclo Binario de Evaporación Instantánea

La rápida evaporación de un fluido durante una despresurización es dependiente de las condiciones de presión y temperatura a las que se encuentre el flujo. Este fenómeno es ampliamente utilizado en la industria aeroespacial, refrigeración, desalación, industria química y otras áreas.

La placa orificio para el CBEI se manufacturó de distintos diámetros para llevar a cabo las pruebas experimentales, están hechas de placa de acero inoxidable y son sujetadas mediante bridas de latón de rosca estándar interna (Bonilla, 2015).

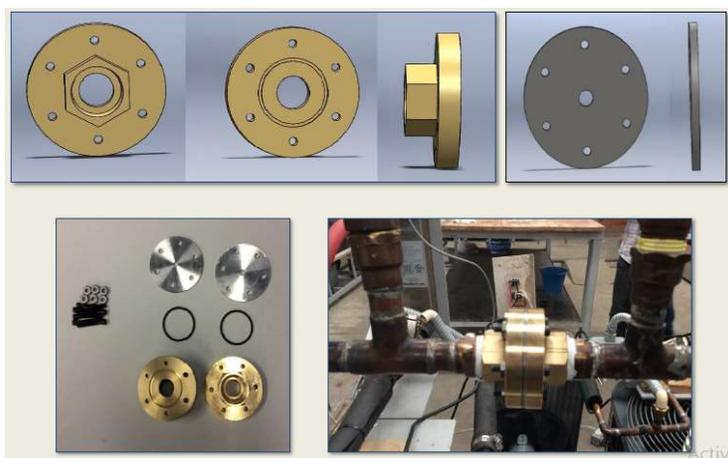


Ilustración 2. 8 Placa orificio (Bonilla, 2015)

## Separador

Los equipos de separación tienen como objetivo separar mezclas de fases ya sea líquido, sólido y vapor para direccionar las fases por separado. El flujo objetivo separado de salida, dependerá del proceso o la aplicación en la que se esté trabajando. Los procesos de separación gas-líquido están basados en una o más combinaciones de mecanismos de sedimentación por gravedad, choque y centrifugación. Algunos tipos de filtración son pocas veces empleados en este tipo de separación. Los principios de separación mecánica en general, pueden ser clasificados como momentum, gravedad, choque y filtración. Dichos mecanismos de separación ocurren solo cuando las fases son inmiscibles y tienen diferentes densidades.

La razón de utilizar un equipo de separación en el CBEI es por la utilización del efecto *flash*, donde se tiene un flujo bifásico y tiene el objetivo de separar las fases y enviar el vapor a la turbina y el líquido al mezclador. El separador seleccionado para el CBEI es de tipo centrífugo y sus ventajas son: una alta eficiencia de separación, fácil manufactura y bajo costo que cumple con lo requerido en el ciclo. (Tejeda, 2012).

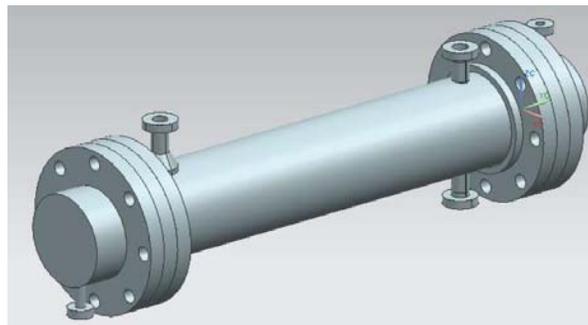


*Ilustración 2. 9 Separador de flujos (Sierra, 2014)*

### Condensador

El condensador también es un dispositivo de intercambio de calor pero su objetivo en este caso es extraer la energía del flujo saliente de la turbina para su recuperación en el ciclo. La velocidad de condensación estará directamente ligada con la cantidad de agua de enfriamiento. Los condensadores se diseñan para operar a una presión menor a la atmosférica, con el propósito de incrementar la expansión del vapor en la turbina, generar mayor trabajo e incrementar la eficiencia.

El condensador que se planea implementarse en el CBEI es de tipo tubo y coraza, es adecuado a las condiciones de trabajo del ciclo. Algunas de sus ventajas es ser un dispositivo de superficie, es enfriado con agua y tiene una baja presión de escape. La superficie son los tubos donde circula el agua de enfriamiento y el vapor a enfriarse circula a través de la coraza (Bernal, 2014).



*Ilustración 2. 10 Condensador (Bernal, 2014)*

### Mezclador

El mezclador para el ciclo tiene la función de recolectar el líquido proveniente del separador de flujos y del vapor condensado proveniente de la turbina. También tiene la función de

## 2. Ciclo Binario de Evaporación Instantánea

almacenar el fluido de trabajo total para el funcionamiento del ciclo. El volumen del tanque está considerado para permitir el suministro suficiente de fluido de trabajo a todo el ciclo el cual es de 10 litros y asegurar que en toda la operación no faltará fluido (IIDEA, 2014).

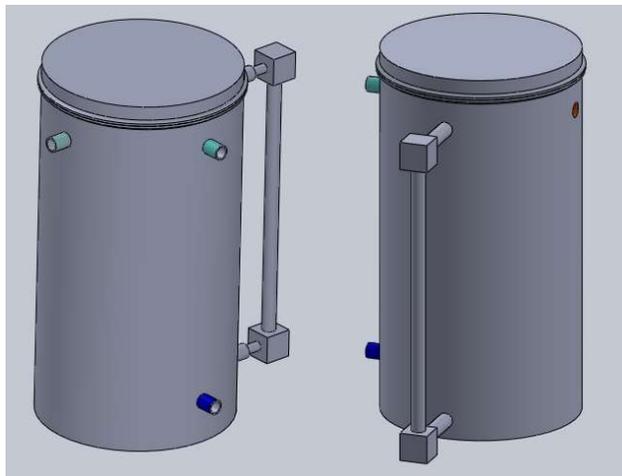


Ilustración 2.11 Mezclador (IIDEA, 2014)

### Turbina

La turbina para el CBEI se tenía pensado en un inicio fuera del tipo impacto la cual utiliza una tobera para acelerar el fluido de trabajo y realizar el trabajo mecánico. También se había contemplado que operará bajo agua, pero debido al planteamiento de utilizar un fluido orgánico como sustancia de trabajo se tendrá que volver a diseñar una turbina que cumpla con las nuevas condiciones. La selección del tipo de turbina está ligada con las propiedades del fluido de trabajo, por tal razón uno de los objetivos es proporcionar la información necesaria para que se lleve a cabo este proceso.

## 2.5 Ciclos binarios explotando energía geotérmica

### Ciclos Binarios en el mundo

Existen actualmente 612 centrales geotermoeléctricas en operación con una capacidad instalada de 12,639 MWe y que se distribuyen en 26 países. En la Tabla 2. 2 se muestra el número de unidades de ciclos de generación con respecto a cada tecnología utilizada, la capacidad instalada y porcentaje de contribución a la generación total. Como se puede observar las plantas de un *flash* son las que tienen la mayor capacidad instalada y generación con 5,079 MWe y 41% respectivamente. Por su parte las plantas binarias son las más numerosas con 286 unidades y que suman una capacidad instalada de 1,790 MWe y una aportación del 12% en la generación, valores muy por debajo de lo visto en las plantas con un *flash* (Bertani, 2015).



Tabla 2. 2 Plantas geotérmicas por tecnología en el mundo (Bertani, 2015)

Tipo	N° Unidades	Capacidad Instalada [MWe]	Generación [%]
Contrapresión	26	181	3.0%
Ciclo binario	286	1,790	12.0%
Un flash	167	5,079	41.0%
Doble flash	68	2,544	21.0%
Triple flash	2	182	1.0%
Vapor seco	63	2,863	22.0%
Total	612	12,639	100.0%

Con base en los datos presentados en la tabla anterior, se presenta en la Ilustración 2. 12 la capacidad instalada y porcentaje de producción de las centrales por tipo de tecnología. Se observa que el mayor dominio tanto en capacidad y producción está a cargo de las unidades con un *flash* con porcentaje de 40% y 41% respectivamente. En el caso de las plantas binarias representan el 14% de la capacidad mundial y 12% de generación total. Para el caso de las plantas con triple *flash* son las que menor capacidad instalada tienen y con una generación también baja, sólo por encima de las planta a contrapresión.

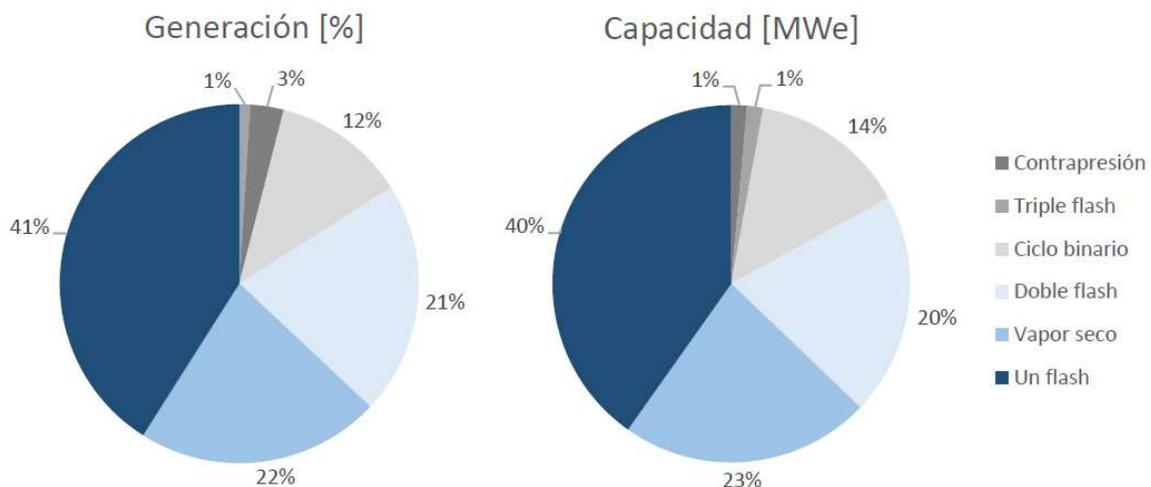


Ilustración 2. 12 Distribución de capacidad y producción de plantas geotérmicas (Bertani, 2015)

### Ciclos binarios en México

México en sus cuatro campos geotérmicos que se encuentran actualmente en explotación, cuentan con la mayoría de tipos de ciclos anteriormente presentados tal como se muestra en la Tabla 2. 3 donde también se presentan las características principales de cada uno. Se observa que las unidades con un *flasheo* son mayormente utilizados contando con un total de 25 unidades, seguidos por 15 unidades a contrapresión. Para el caso de los ciclos binarios,



## 2. Ciclo Binario de Evaporación Instantánea

se dispone actualmente sólo con 2 unidades en el campo geotérmico Los Azufres, Michoacán pero se encuentran fuera de operación y tienen una capacidad instalada de 1.5 MWe cada una.

También se encuentra en proceso de desarrollo una planta binaria en el campo Las Tres Vírgenes que está planificada para tener una capacidad instalada de 2 MWe. Se tiene previsto también construir más unidades en los diferentes campos geotermoeléctricos pero todos serían de tipo de un *flash* (Gutiérrez Negrín, 2015).

Otro proyecto del uso de ciclos binarios en México lo está desarrollando la empresa Prados Camelinas y la Universidad Michoacana en San Nicolás de Hidalgo que plantea instalar en el poblado de Simirao una planta de ciclo binario demostrativa del tipo solar – geotérmico de 300 kW. También hay otros proyectos de inversión privada para la explotación de geotermia pero utilizando ciclos a contrapresión (Requena, 2015).

### 2.5 Conclusión

El CBEI busca explotar aquellos recursos geotérmicos que hasta el momento no han sido tomados en cuenta en materia de generación de energía eléctrica, debido al gran potencial que tiene México de recursos geotérmicos de baja y media entalpía como se mencionó en este capítulo. Aunque claramente el contenido energético en estos recursos es bajo, si se tiene un buen diseño para su aprovechamiento se puede obtener resultados satisfactorios y económicamente viables. La eficiencia del proceso recae en mayor medida en el diseño del ciclo, sin importar los demás factores, que aunque también afectan, pero lo hacen en menor magnitud como es el caso del volumen del yacimiento, propiedades de la roca, entre otros.

El planteamiento del CBEI es una alternativa factible ya que explotaría una energía limpia y contribuiría a la disminución de la dependencia de la quema de combustibles fósiles, tomando en cuenta que la prospección mundial por el uso de energía limpia va en aumento conforme la demanda energética y la necesidad de no seguir afectando al ambiente aumente.

En México hay pocas plantas binarias debido a la baja generación que presenta en comparación con los demás tecnologías sin embargo, este ciclo podría no solo aplicarse en la explotación de geotermia sino en la recuperación del calor remanente en procesos industriales, ya que muchos casos arrojan al ambiente los gases o fluidos saliente de sus procesos aún a una alta temperatura.



2. Ciclo Binario de Evaporación Instantánea

Tabla 2. 3 Plantas geotermoelectricas en México (Gutiérrez Negrín, 2015)

Localidad	Nombre (unidades)	Año	Estado	Tipo de unidad	Capacidad instalada [MWe]	Generación total [MWe]	Producción de energía anual en 2013 [GWh]	Potencia planificada [Mwe]	
Cerro Prieto	CP-I U-1	1973	N	1F	37.50	0.00	0.00		
	U-2	1973	N	1F	37.50	0.00	0.00		
	U-3	1979	N	1F	37.50	0.00	0.00		
	U-4	1979	N	1F	37.50	0.00	0.00		
	U-5	1982		2F	30.00	30.00	251.04		
	CP-II U-1	1986		2F	110.00	110.00	875.01		
	U-2	1987		2F	110.00	110.00	696.60		
	CP-III U-1	1986		2F	110.00	110.00	835.58		
	U-2	1987		2F	110.00	110.00	602.22		
	CP-IV U-1	2000		1F	25.00	25.00	164.04		
	U-2	2000		1F	25.00	25.00	225.43		
	U-3	2000		1F	25.00	25.00	237.14		
	U-4	2000		1F	25.00	25.00	239.96		
Mexicali		2018		1F				100.00	
Los Azufres	U-2	1982		O	5.00	5.00	42.58		
	U-3	1982		O	5.00	5.00	40.61		
	U-4	1982		O	5.00	5.00	44.09		
	U-5	1982		O	5.00	5.00	43.63		
	U-6	1986		O	5.00	5.00	43.64		
	U-7	1988		1F	50.00	50.00	386.12		
	U-9	1990		O	5.00	5.00	43.60		
	U-10	1992		O	5.00	5.00	43.23		
	U-11	1993	N	B	1.50	0.00	0.00		
	U-12	1993	N	B	1.50	0.00	0.00		
	U-13	2003		1F	26.50	26.50	207.41		
	U-14	2003		1F	26.50	26.50	202.81		
	U-15	2003		1F	26.50	26.50	211.91		
	U-16	2003		1F	26.50	26.50	232.76		
	AZ III-1		2015		1F				50.00
	AZ III-2		2018		1F				25.00
AZ-IV		2020		1F				75.00	
Los Humeros	U-1	1990	N	O	5.00	0.00	0.00		
	U-2	1990	N	O	5.00	0.00	0.00		
	U-3	1991		O	5.00	5.00	42.08		
	U-4	2003	N	O	5.00	0.00	4.53		
	U-5	1991	N	O	5.00	0.00	0.00		
	U-6	1992		O	5.00	5.00	25.96		
	U-7	1994	N	O	5.00	0.00	4.87		
	U-8	2008		O	5.00	5.00	42.24		
	HUM II-A		2012		1F	26.70	26.70	226.10	
	HUM II-B		2013		1F	26.70	26.70	0.00	
	HUM III-A		2016		1F				27.00
HUM III-B		2018		1F				27.00	
Las Tres Vírgenes	U-1	2002		1F	5.00	5.00	28.97		
	U-2	2002		1F	5.00	5.00	25.60		
	U-3			B				2.00	
Cerritos Colorados	U-1			1F				25.00	
	U-2			1F				50.00	
Otras zonas								60.00	
<b>Total</b>					<b>1017.40</b>	<b>839.40</b>	<b>6069.70</b>	<b>441.00</b>	

\*N: Fuera de operación. Tipo de ciclo; 1F: con un *flash*; 2F: con dos *flash*; B: binario; O: otro (contrapresión)





## 3. Selección del fluido de trabajo

### Introducción

La arquitectura general de un ciclo de potencia, el tamaño de los equipos y aspectos económicos depende en gran magnitud de las propiedades termo físicas del fluido de trabajo (FT). Una selección adecuada del FT es de vital importancia para la eficiencia del ciclo. Se considera principalmente las condiciones de la fuente de calor y la capacidad que tiene este fluido para absorber la misma ya que habrá ciertos fluidos que muestren mejor desempeño a ciertas condiciones.

El inconveniente que existe en la explotación de los recursos geotérmicos de baja y media entalpía es que tienen una baja temperatura. Es por ello que se propone utilizar como fluido de trabajo un fluido orgánico o también conocido como refrigerante en el CBEI, donde la principal característica que presentan es transportar e intercambiar la energía térmica con su medio de forma más eficiente en comparación con el agua, además de tener un bajo punto de ebullición.

La selección del fluido de trabajo incluirá un análisis de eficiencia exergética o también conocida como eficiencia de segunda ley para identificar aquellos que presenten el mejor desempeño. También este análisis servirá para determinar la condición óptima de separación que se origina después del efecto *flash*, el flujo de entrada a la turbina se ve afectado por este estado. El análisis se apoyará utilizando el software REFPROP para la obtención de los datos termodinámicos. La selección de los parámetros que involucra la selección del fluido de trabajo también se describirá en el presente capítulo, así como la integración de metodologías de selección que se usarán para la evaluación de cada uno de ellos y así construir una matriz de decisión. Se utilizará diversas herramientas adicionales como hojas de especificaciones, hojas de seguridad, el uso del software REFPROP, etc.



Ilustración 3. 1 Comparativa entre usar en el ciclo agua como fluido de trabajo o un fluido orgánico.





### 3.1 Metodología de selección

Para la selección del fluido de trabajo se dividirá en dos filtros. El primero será la “Pre-selección” donde se evaluarán aquellos fluidos de trabajo que cumplan con las condiciones de temperatura de la fuente de calor con respecto a sus condiciones críticas. El segundo filtro se realizará en dos partes:

- Eficiencia Exergética, este análisis se realiza con el fin de identificar aquel fluido que presenten mayor eficiencia en el ciclo e identificar la temperatura y presión de separación óptima.
- Matriz de decisión, se toman en cuenta las propiedades de las sustancias y se evaluará su desempeño con respecto en la aplicación en el CBEI. También se integrarán los resultados del análisis exergético.

Se llevará a cabo la evaluación global de todos los fluidos de trabajo propuestos, siendo el de mayor puntaje el fluido principal a implementarse en el ciclo y el segundo lugar como una propuesta alternativa.

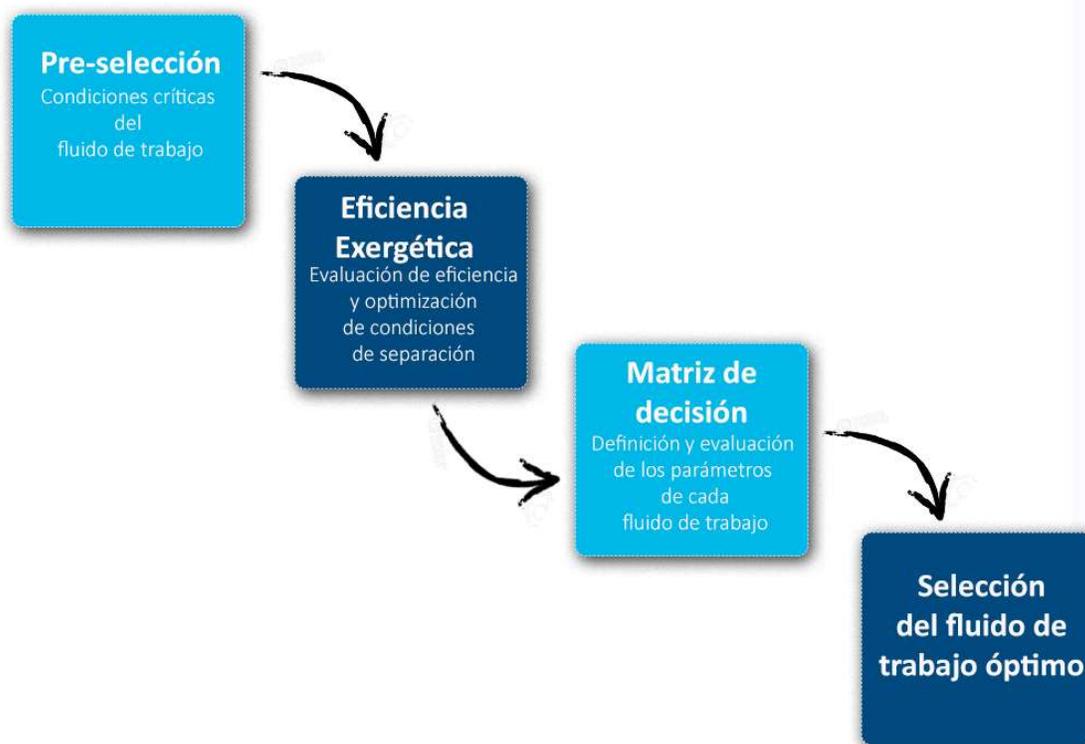


Ilustración 3. 2 Diagrama de flujo para la selección



### 3. Selección del fluido de trabajo

#### 3.2 Refrigerantes y sus características

Los refrigerantes son sustancias químicas conformadas por varios elementos químicos de los cuales destacan el carbono, cloro, hidrógeno y flúor.

Son utilizados como medio de transporte de energía para llevar a cabo un proceso en un sistema térmico debido a que sus propiedades químicas tienen mejor desempeño que otras sustancias como es el caso del agua. La *standard 34* de la ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*) otorga una nomenclatura de forma abreviada para cada refrigerante según sus características químicas, también asigna una clasificación para cada uno de ellos por su nivel de seguridad tomando en cuenta su toxicidad e inflamabilidad.

Una de estas clasificaciones, los agrupa por sus propiedades químicas:

- **Orgánicos.** Son aquellos que su estructura atómica tiene enlaces de carbono - hidrógeno.
  - ✓ **CFC** (Clorofluorocarbono). Son aquellos que están formados por átomos de carbono, flúor y cloro. Tienen una gran capacidad de destrucción de la capa de ozono (ODP, *Ozone Depletion Potential*) debido a su gran inestabilidad. Son miscibles y solubles en aceites minerales y sintéticos. Actualmente, su uso está restringido debido a que están constituidos por cloro, el cual daña la capa de ozono.
  - ✓ **HCFC** (Hidroclorofluorocarbono). Son aquellos que están formados por átomos de hidrogeno, carbono, flúor y cloro. Debido a que son menos inestables que los anteriores, tienen menor impacto en la destrucción de la capa de ozono. Por ello, son denominados refrigerantes en transición, puesto que han sido una solución intermedia a la sustitución de los CFC.
  - ✓ **HFC** (Hidrofluorocarbono). No contienen cloro en su composición, solo contienen flúor, hidrógeno y carbono. Al no poseer cloro, no afectan a la capa de ozono.
  - ✓ **HC.** Son aquellos que están formados por átomos de carbono e hidrógeno. Estos son sustancias del tipo no halogenadas, esto significa que no contienen elementos de la columna 17 de la tabla periódica como son el cloro y el flúor.
- **Inorgánicos.** Son aquellos que no poseen enlaces carbono – hidrógeno en su estructura. Se caracterizan por su bajo costo y por tener un ODP bajo.

Mediante una investigación sobre los fluidos de trabajo que utilizan y se estudian actualmente para la implementación en ORC se obtuvo un listado para ser evaluados propiamente en el CBEI y se muestran en la Ilustración 3. 3.

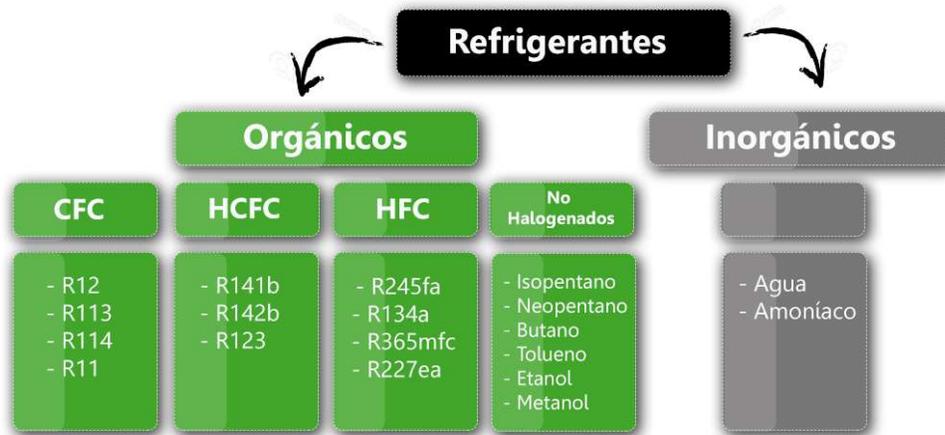


Ilustración 3. 3 Clasificación de los refrigerantes propuestos por su composición química.

### 3.3 Pre-selección

La temperatura crítica de los fluidos candidatos condiciona su implementación en el CBEI con respecto a la temperatura de la fuente de calor. Aquellos fluidos que tengan una temperatura crítica por debajo de la temperatura de la fuente de calor, serán descartados del proceso de selección ya que a condiciones críticas, el líquido y vapor coexisten y son indistinguibles, por lo tanto la sustancia no puede considerarse ni como gas ni como líquido y como consecuencia sus características se ven alteradas, algunas de ellas son inherentes a los gases y otros a los líquidos, a estas sustancias se le denomina “fluidos supercríticos” (Velásquez, 2008). El CBEI para su operación requiere de fases definidas al no estar diseñado como un ciclo supercrítico.

Se tomará una temperatura de referencia de 137 °C para la pre-selección, esta temperatura corresponde a una fuente de calor de 140 °C con un acercamiento esperado en el intercambiador de calor de 3 °C.

Tabla 3. 1 Temperaturas críticas de los fluidos a analizar

Fluido	Temperatura <sub>crit</sub> [°C]	Fluido	Temperatura <sub>crit</sub> [°C]
Agua	368.00	R123	183.80
Tolueno	318.60	Neopentano	160.60
R245FA	256.90	Butano	151.96
Etanol	241.56	R114	145.68
Metanol	240.23	R142b	137.11
R113	214.06	R717 (amoníaco)	133.00
R141b	204.15	R12	112.00
R11	197.96	R227ea	101.75
Isopentano	187.80	R134a	100.95
R365mfc	186.85		

Los fluidos marcados en color rojo se descartarán para el análisis.



### 3. Selección del fluido de trabajo

#### 3.4 Eficiencia exergética

Se realizará el análisis de exergía para evaluar a cada fluido de trabajo con base en su eficiencia exergética o también conocida como eficiencia de segunda ley que contiene información con un menor grado de incertidumbre al considerar las irreversibilidades del sistema y la máxima energía disponible que se podría aprovechar de la fuente de calor. También un objetivo principal para este análisis es obtener las condiciones óptimas de separación dentro del ciclo para conseguir un mayor trabajo en la turbina.

#### **Eficiencia Exergética**

La eficiencia por primera ley de la Termodinámica no hace referencia al mejor desempeño posible y es por esta deficiencia que se introduce la eficiencia por segunda ley donde cuantifica el mejor desempeño real posible. Un ejemplo de la vida cotidiana lo podemos observar en el siguiente escenario, si tomamos como referencia la eficiencia de primera ley definiría que un logro obtenido es dependiente del esfuerzo que se le haya dedicado; tomando como referencia la eficiencia por segunda ley definiría que el logro es dependiente de cómo es que se aplicó el esfuerzo. En otras palabras y de forma más generalizada, la eficiencia por primera ley solo considera la cantidad de energía disponible y por su parte la eficiencia de segunda ley considera la calidad de energía disponible (A. Cengel & A. Boles, s.f.).

Por definición la eficiencia exergética se expresa de la siguiente forma (DiPippo, 2007):

$$\eta_{II} = \frac{W_{neto}}{E} \quad (3.0)$$

Donde  $E$  es la exergía de la fuente de calor o en otras palabras es la máxima energía disponible en la fuente de calor:

$$E = h_{pozo} - h_0 - T_0(s_{pozo} - s_0) \quad (3.1)$$

Donde  $h_0, T_0, s_0$  son entalpía, temperatura y entropía respectivamente a condiciones ambientales.

Siguiendo el esquema de la Ilustración 2. 5, el trabajo neto se expresa de la siguiente forma:

$$W_{neto} = W_t - W_{B1} - W_{B2} \quad (3.2)$$

Las ecuaciones para obtener cada trabajo se plantearon en el capítulo anterior donde contemplan las eficiencias isentrópicas de los equipos.



### Datos técnicos para el análisis

A continuación en la Tabla 3. 2 se muestran los datos técnicos que se utilizarán para el análisis exergético.

Tabla 3. 2 Datos técnicos del CBEI

<b>Reservorio</b>	
Temperatura [°C]	140.00
Presión [bar]	3.61
Fluido	Agua
<b>Intercambiador de calor</b>	
Temperatura [°C]	137.00
Presión [Bar]	29.65
Acercamiento [°C]	3.00
<b>Condensador</b>	
Caída de presión [Mpa]	0.01
$\Delta T$ agua de enfriamiento [°C]	10.00
<b>Eficiencias</b>	
Eficiencia isentrópica Turbina [%]	50.00
Eficiencia isentrópica Bombas [%]	65.00

**Temperatura de separación.** Para encontrar el valor de la temperatura de separación óptima se inicia utilizando una expresión “regla empírica”, la cual dice que la temperatura óptima de separación se encuentra con el promedio de la temperatura del reservorio, que en nuestro análisis es el intercambiador de calor y la temperatura de condensación (DiPippo, 2007). Esta regla no es un dato absoluto, puede diferir en muchos casos, es por ello que se llevará a cabo el análisis completo.

$$T_{sep_{opt}} = \frac{T_{inter} + T_{cond}}{2} \quad (3.3)$$

La temperatura de condensación cambia para cada fluido de trabajo y se considera idealmente la presión mínima de condensación ya que a estas condiciones habrá un mayor trabajo en la turbina incrementando la eficiencia del ciclo, condiciones ideales. Esta presión de condensación toma en cuenta la caída de presión en el condensador de 0.01 MPa y una variación de 10°C del agua de enfriamiento.

A partir de la Temperatura óptima de separación inicial se propone un intervalo de valores para la obtención de los datos.



## Resultados

En la Ilustración 3. 4 se muestran representados los datos obtenidos de la eficiencia exergética para cada sustancia. Se realizó este análisis para los quince fluidos de trabajo propuestos, todos bajo los mismos criterios técnicos mostrados en la Tabla 3. 2.

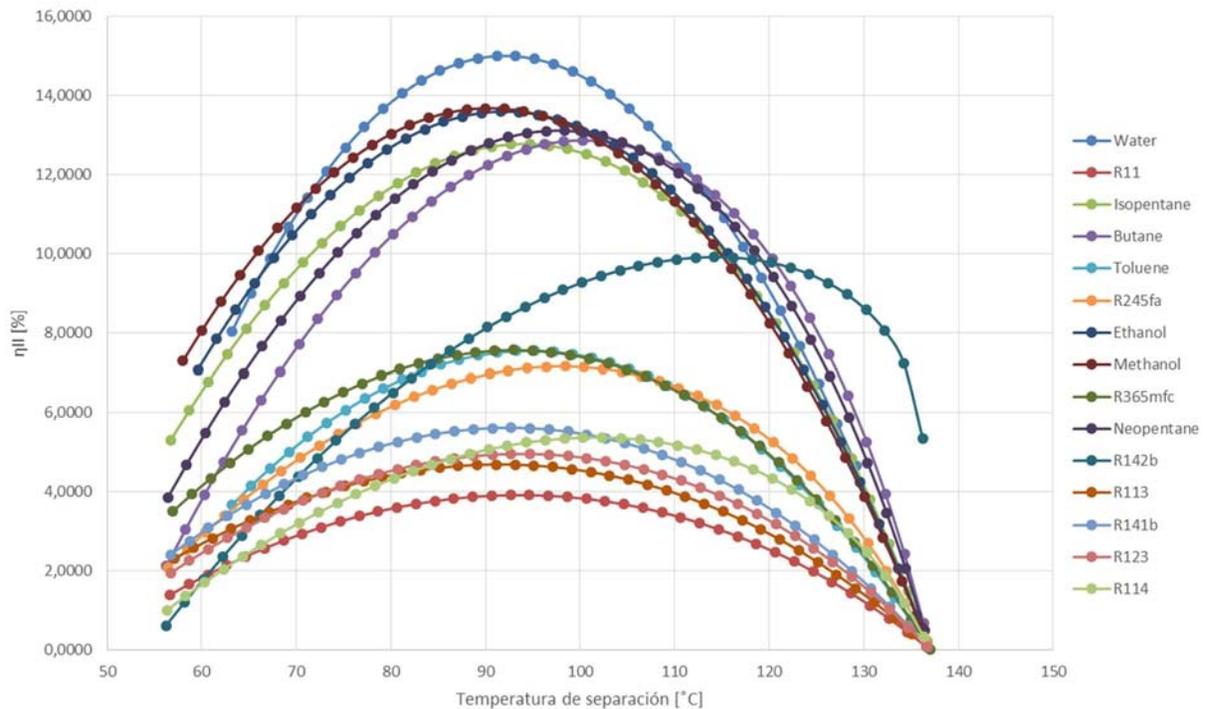


Ilustración 3. 4 Curvas temperatura de separación vs eficiencia exergética

En el gráfico se puede observar que el agua es el que alcanza una mayor eficiencia cercana al 15 %, seguido por el metanol y el etanol. Los fluidos con una menor eficiencia se observa el R11 cercano al 4%, seguido por el R113 y el R123. En todas las curvas se puede observar un decaimiento en la eficiencia y esto se debe a que el ciclo realmente es un sistema irreversible lo que ocasiona una disminución del trabajo útil. La generación de entropía se da por el aumento de temperatura, fricción, mezclado, transferencia de calor, libre expansión y son fenómenos que se presentan en el ciclo (A. Cengel & A. Boles, s.f.).

En muchos casos la mayor pérdida de trabajo útil o también conocida como destrucción de exergía, se origina en los intercambiadores de calor, por lo que si se quisiera disminuir este efecto, se tendría que analizar equipo por equipo; este análisis se llevará a cabo en el posterior capítulo con el o los fluidos seleccionados.

En la Tabla 3. 3 se muestran los datos obtenidos del análisis, se muestra la presión de condensación utilizada para cada fluido y la presión de separación correspondiente al punto de mayor eficiencia. También se muestra el trabajo máximo posible, así como la eficiencia exergética del CBEI correspondiente al utilizar cada uno de los fluidos.



Tabla 3. 3 Resultados del análisis exergético

Tipo	Fluido	$P_{cond}$ [MPa]	$T_{sep}$ [°C]	$W_{neto}$ [kW]	$\eta_{II}$ [%]
INOR	Agua	0.01	91.21	11.16	15.00
INOR	Metanol	0.03	90.03	10.18	13.68
INOR	Etanol	0.02	91.59	10.12	13.60
HC	Neopentano	0.24	98.41	9.76	13.11
HC	Butano	0.33	100.30	9.58	12.87
HC	Isopentano	0.14	94.70	9.51	12.77
HCFC	R142b	0.46	114.22	7.38	9.92
HFC	R365mfc	0.09	92.97	5.63	7.56
HC	Tolueno	0.01	95.22	5.62	7.55
HFC	R245FA	0.22	98.43	5.33	7.16
HCFC	R141b	0.12	92.73	4.18	5.62
CFC	R114	0.30	102.33	4.00	5.37
HCFC	R123	0.14	94.71	3.69	4.95
CFC	R113	0.07	91.13	3.49	4.69
CFC	R11	0.16	92.64	2.91	3.91

La eficiencia exergética forma parte de la matriz de decisión, es por ello que se lleva a cabo la ponderación para cada fluido como se muestra en la Tabla 3. 4, donde la referencia de ponderación será el agua que alcanzó el máximo valor de eficiencia.

Tabla 3. 4 Ponderación respecto a la eficiencia exergética

Fluido	$\eta_{II}$ [%]	Ponderación
Agua	15.00	1.00
Metanol	13.68	0.91
Etanol	13.60	0.91
Neopentano	13.11	0.87
Butano	12.87	0.86
Isopentano	12.77	0.85
R142b	9.92	0.66
R365mfc	7.56	0.50
Tolueno	7.55	0.50
R245FA	7.16	0.48
R141b	5.62	0.37
R114	5.37	0.36
R123	4.95	0.33
R113	4.69	0.31
R11	3.91	0.26

### 3. Selección del fluido de trabajo

#### 3.5 Matriz de decisión

Los parámetros a considerar para la construcción de la matriz de decisión se dividirán por categorías como se muestra en la Ilustración 3. 5. Las propiedades termo físicas del fluido de trabajo son importantes contemplarlas con el fin de inferir la forma en la que se comportará el fluido en operación así como para dimensionar los equipos; las medidas de seguridad se toman en cuenta para determinar el manejo adecuado de la sustancia y tomar las medidas precautorias para evitar siniestros. El impacto ambiental también es de gran importancia debido a que varias de los fluidos orgánicos contribuyen a la alteración de nuestro ambiente como es el caso del efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono. Por último la eficiencia exergética nos dará valores cuantitativos acerca del desempeño real del proceso.



Ilustración 3. 5 Parámetros para la matriz de decisión.

Para la selección deberá existir un equilibrio entre cada parámetro, es por ello que se realizará una evaluación entre ellos para determinar el porcentaje de importancia de cada uno enfocados en la implementación en el CBEI y así realizar una toma de decisión objetiva con respecto a los requerimientos. Los porcentajes obtenidos se considerarán hasta la construcción de la matriz de decisión.

##### 3.5.1 Definición de porcentajes de importancia entre parámetros

Una vez definidos los parámetros que se utilizarán para la selección, se procede a realizar una evaluación entre parámetros.

El número de combinaciones estarán definidas por combinaciones sin repetición, siguiendo la definición (3.4) se obtienen las combinaciones.



$$C_m^n = \frac{m!}{n!(m-n)!} \quad (3.4)$$

Dónde,

m = número total de parámetros.

n = número de parámetros a comparar o combinar.

Para el caso de aplicación se evaluarán ocho parámetros ( $m = 8$ ) y se compararán de dos en dos parámetros ( $n = 2$ ) por lo tanto se tiene el siguiente número de combinaciones:

$$C_8^2 = \frac{8!}{2!(8-2)!} = 28 \text{ combinaciones}$$

Una vez definido el número de combinaciones se procede a realizar las comparaciones entre pares de parámetros con base en los criterios expuestos en la Tabla 3. 5 que representan los factores que involucran en cada uno de ellos.

Tabla 3. 5 Criterios de comparación de los parámetros

Parámetro	Criterio
<b>Inflamabilidad &amp; Toxicidad</b>	Normas de seguridad, equipos contra incendio, fugas, costos.
<b>Humedad</b>	Corrosión, incrustaciones en equipos, condensado en la expansión en la turbina, vibraciones, mantenimientos, costos.
<b>ODP</b>	Destrucción de la capa de ozono, regulación ambiental.
<b>Eficiencia Exergética</b>	Mayor aprovechamiento de la fuente de calor, mayor generación de trabajo, costos.
<b>GWP</b>	Contribución al efecto invernadero, regulación ambiental.
<b>Calor latente</b>	Flujo másico del FT, costos.
<b>Peso molecular</b>	Tamaño de los equipos, costos, espacio.
<b>Punto de ebullición</b>	Posibilidad de aprovechar la fuente de calor



### 3. Selección del fluido de trabajo

A continuación se presenta la matriz comparativa entre parámetros (Tabla 3. 6). En la parte izquierda se muestran los parámetros asignándoles un número de identificación. En la parte superior de la matriz se muestran números en fracciones, esto representan los parámetros a comparar que corresponden a sus números de identificación. Para la evaluación se considera que aquel parámetro con mayor importancia en la aplicación en el ciclo, se le asigna un valor de 1 y para aquel con menor importancia se le asigna un valor de 0. Este proceso se realiza para las 28 combinaciones posibles. En la parte de la derecha se muestra la suma del puntaje total que presenta cada parámetro a lo largo de las comparaciones y por último se determina el porcentaje de importancia.

Tabla 3. 6 Matriz comparativa entre parámetros

		1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	2/3	2/4	2/5	2/6	2/7	2/8	3/4	3/5	3/6	3/7	3/8	4/5	4/6	4/7	4/8	5/6	5/7	5/8	6/7	6/8	7/8	Suma	Importancia	
1	Peso Molecular	1	0	0	0	0	0	0																						1	0.0357	
2	Punto de Ebu.	0	1						1	0	0	0	0	0																	1	0.0357
3	Calor Latente			1						1					0	0	0	0	0												1	0.0357
4	Humedad				1						1				1					0	1	1	1								6	0.2143
5	Inflamabilidad & Toxicidad					1						1				1								1	1	1					7	0.2500
6	GWP						1						1				1							0			0	0			3	0.1071
7	ODP							1						1				1									1		0		4	0.1429
8	Eficiencia Exergética								1							1							0				1	1			5	0.1786
																										Total	28	1				

De la matriz se determinan los porcentajes de importancia para cada parámetro y se concluye que los parámetros de inflamabilidad & toxicidad tienen el mayor porcentaje de importancia con el 25%; en segundo lugar se ubica el grado de humedad con el 21.43% y tercer lugar la eficiencia exergética con un 17.86%. En algunos casos la eficiencia del ciclo es la prioridad del sistema, sin embargo se considera que los aspectos físicos son más importantes, como que el grado de humedad del fluido sea bajo, para no afectar a los dispositivos del ciclo y evitar hacer mantenimientos sucesivos; es más conveniente un sistema que trabaje sin complicaciones para su operación. Los parámetros con menor importancia fueron la densidad, punto de ebullición y calor latente, todos con un 3.57% de importancia esto se justifica con la razón de que estos parámetros se pueden solucionar mediante métodos más sencillos y de menor costo comparado con los demás.



### 3.5.2 Ponderación de cada parámetro

Para la ponderación de cada parámetro se toma como valor de referencia el del fluido de trabajo (Ilustración 3. 3) que cumpla mejor con el requerimiento en cada parámetro y a partir de este valor se obtendrá la ponderación para los demás fluidos, el rango de valores posibles en la ponderación es de 1 a 0. Un ejemplo es que el fluido de trabajo se busca que tenga un calor latente de vaporización elevado, por lo tanto, el fluido que cumple el valor más elevado es el agua, se le asigna el valor de 1 y a partir de éste se ponderará los demás fluidos.

Es importante tener presente que las ponderaciones se realizaron sólo para este grupo de fluidos y si se añadiera otro fluido, posiblemente debido a sus propiedades, alguna de la ponderación se vería afectada y por tanto toda la matriz de decisión.

#### Peso molecular

Los refrigerantes se caracterizan por tener un alto peso molecular con respecto al agua, propiedad que beneficia al incrementar el flujo másico del fluido de trabajo. El flujo másico es una propiedad importante para el trabajo en la turbina, mientras mayor sea este, mayor será el trabajo y por la tanto la eficiencia incrementará (Li, 2012).

Por lo tanto, se ponderará con el máximo valor aquel fluido que tenga mayor peso molecular y decreciendo para los que tengan menor valor, tal y como se muestra en la Tabla 3. 7.

Tabla 3. 7 Ponderación con respecto a su peso molecular.

Fluido	Peso Molecular [g/mol]	Ponderación
R113	187.38	1.00
R114	170.92	0.91
R123	152.00	0.81
R365mfc	148.00	0.79
R11	137.37	0.73
R245FA	134.05	0.72
R141b	116.95	0.62
R142b	100.50	0.54
Tolueno	92.13	0.49
Isopentano	72.15	0.39
Neopentano	72.15	0.39
Butano	58.08	0.31
Etanol	46.07	0.25
Metanol	37.04	0.20
Agua	18.00	0.10

### Calor latente de vaporización

El calor latente de vaporización, es aquella energía térmica necesaria para llevar a una sustancia a condiciones de saturación a presión constante. Este proceso se lleva a cabo en el intercambiador de placas del CBEI. Si se realiza un balance de masa y de energía en este dispositivo, siguiendo el esquema de la Ilustración 3. 6 se obtiene lo siguiente:

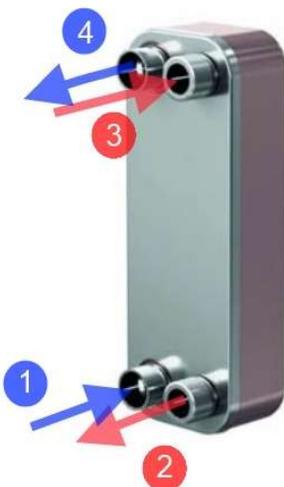


Ilustración 3. 6 Volumen de control (Intercambiador de placas).

Balance de masa:

Los flujos del fluido de trabajo y del fluido geotérmico no se mezclan:

$$\dot{m}_{FT} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (3.4)$$

$$\dot{m}_{FG} = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (3.5)$$

Donde,

$\dot{m}_{FT}$  = fl másico del fluido de trabajo.

$\dot{m}_{FG}$  = flujo másico del fluido geotérmico.

Balance de energía:

$$\dot{m}_{FT}h_1 + \dot{m}_{FG}h_3 = \dot{m}_{FT}h_2 + \dot{m}_{FG}h_4 \quad (3.6)$$

$$\dot{m}_{FT} = \dot{m}_{FG} \frac{(h_4 - h_3)}{(h_1 - h_2)} \quad (3.7)$$

De la expresión (3.7) se observa que cuanto mayor es la magnitud de la diferencia de entalpías en los estados 1 y 2, que es precisamente el calor latente de vaporización que requiere el fluido de trabajo para llegar a la condición de saturación, el flujo másico del mismo disminuye. Por lo tanto es mejor utilizar un fluido de trabajo con un alto calor latente



y utilizar un menor gasto másico en comparación a un fluido con bajo calor latente y gran cantidad de gasto, suponiendo que en ambos casos sea la misma energía disponible.

Utilizar un bajo gasto másico significaría utilizar un tanque de almacenamiento pequeño, bombas de circulación de menor potencia, pero sin perder de vista que también el gasto impacta en la generación en la turbina, por lo que se tendría que evaluar un punto óptimo entre lo mencionado.

Citando lo descrito en los anteriores párrafos se procede a ponderizar esta propiedad para cada fluido como se muestra en la Tabla 3. 8, se asigna el valor máximo a aquellos fluidos con mayor calor latente de vaporización y decreciente valor conforme disminuye dicho parámetro.

Tabla 3. 8 Ponderación de cada fluido con respecto a su calor latente

Fluido	Calor Latente [KJ/kg] $P=1\text{ MPa}$	Ponderación
Agua	2014.59	1.00
Metanol	911.24	0.45
Etanol	686.61	0.34
Butano	293.70	0.15
Tolueno	273.71	0.14
Isopentano	254.46	0.13
Neopentano	231.04	0.11
R141b	171.80	0.09
R142b	170.27	0.08
R245FA	144.16	0.07
R11	141.57	0.07
R365mfc	136.44	0.07
R123	126.78	0.06
R113	106.81	0.05
R114	99.74	0.05

### Punto de ebullición

Se requiere que el punto de ebullición del fluido de trabajo sea de bajo valor; esto para que pueda existir el aprovechamiento de una fuente de calor de baja temperatura (Madhawa, et al., 2006). Existen algunos refrigerantes que a condiciones ambientales comienzan a evaporarse, caso contrario al agua que requiere de aproximadamente 100 °C a presión atmosférica a nivel del mar.

Siguiendo lo mencionado en el anterior párrafo se procede a ponderar cada fluido como se muestra en la Tabla 3. 9.



### 3. Selección del fluido de trabajo

Tabla 3. 9 Ponderación de cada fluido con respecto a su punto de ebullición

Fluido	Punto de Ebu. 77.8 kPa [ °C ]	Ponderación
R142b	-15.46	1.00
Butano	-7.25	0.55
R114	-3.14	0.45
Neopentano	2.42	0.36
R245FA	8.76	0.29
R11	16.46	0.24
Isopentano	20.42	0.22
R123	20.76	0.22
R141b	24.76	0.20
R365mfc	33.06	0.17
R113	39.84	0.15
Metanol	57.91	0.12
Etanol	71.87	0.10
Agua	92.76	0.08
Tolueno	101.55	0.08

#### Grado de Humedad en el fluido

La corrosión e incrustaciones es una de las diversas causas de falla en equipos industriales y específicamente en nuestro caso de análisis en la turbina. Los ambientes corrosivos son diversos y uno de ellos es el ambiente húmedo. Las partes más afectadas en la turbina debido a este fenómeno son los álabes, que causa un desequilibrio al modificar la distribución de pesos a lo largo del eje de rotación. Una vez que se detecta la falla en la turbina, se tiene que extraer el rotor completamente y realizar una limpieza; en caso de incrustaciones se tiene que tomar una muestra de las partículas para conocer su origen y tomar una medida correctiva. Otro problemática es que si hay presencia de partículas de agua líquida en la entrada de la turbina, el choque de estas partículas a gran velocidad contra la turbina también puede causar desequilibrios y vibraciones (Energiza.org, 2011).

Una solución para evitar esta situación es el precalentamiento del fluido antes de la entrada a la turbina, pero se necesitaría de un evaporador extra y no sería viable económicamente hablando. Por lo tanto una propiedad indeseable en el fluido de trabajo es que su contenido de humedad sea alto, evitando esto, se prolonga la vida útil de los quipos y se reducen periodos de mantenimiento y costos.



En los diagramas T-S correspondiente a cada fluido de trabajo se puede obtener información respecto al grado de humedad que contiene cada uno de ellos (Saadatfar, et al., 2013). Los fluidos según su grado de humedad se clasifican en:

- Fluido Isentrópico. Si se tiene una pendiente infinita en la línea de vapor.
- Fluido húmedo. Si se tiene una pendiente negativa en la línea de vapor.
- Fluido seco. Si se tiene una pendiente positiva en la línea de vapor.

Los fluidos isentrópicos y secos evitan la formación de mezcla de dos fases en el proceso de expansión dentro de la turbina; mientras que los primeros mantienen la entropía constante, los fluidos secos terminando el proceso de expansión se mantienen en la zona de vapor sobrecalentado.

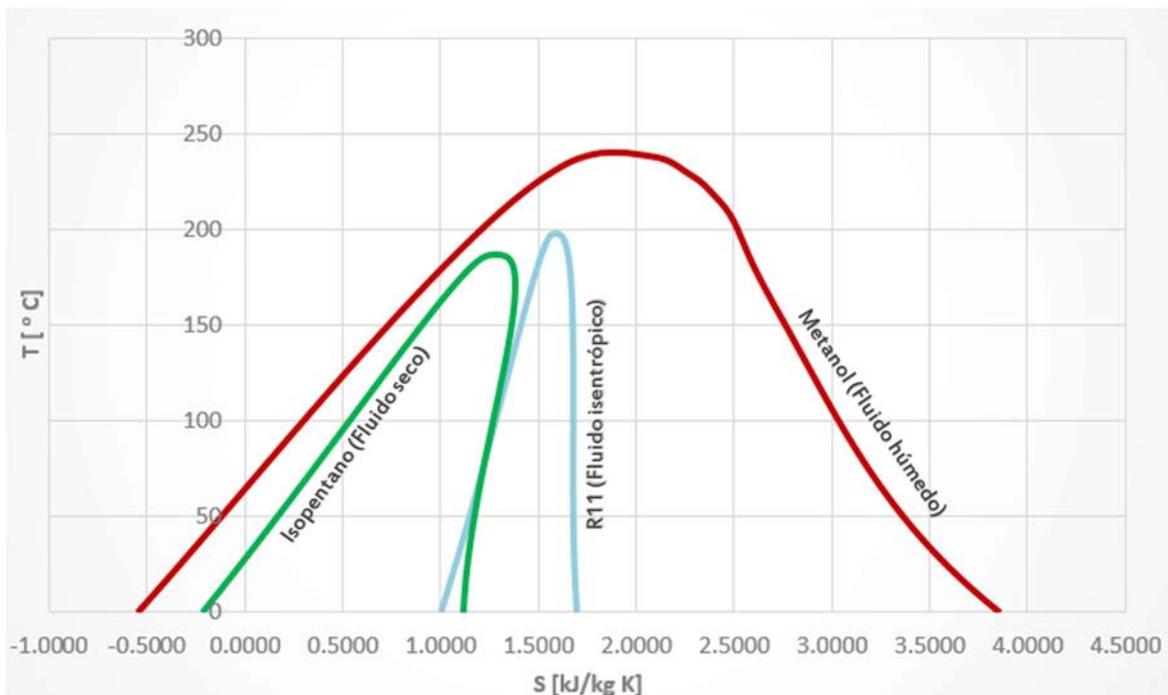


Ilustración 3. 7 Diagramas T-S. Tipos de fluido.

Para tener un criterio cuantitativo para la clasificación del tipo de fluido se introduce una expresión para calcular el cambio de entropía con respecto a la temperatura:

$\xi = \frac{dS}{dT}$  (Bo-Tau Liu, 2004), donde  $\xi$  es la inversa de la pendiente a la curva de vapor saturado en el diagrama T – S y se muestra en la ecuación (3.8).

$$\xi = \frac{C_P}{T_H} - \frac{\left(\frac{n T_{rH}}{1 - T_{rH}}\right) + 1}{T_H^2} \Delta H_H \quad (3.8)$$



### 3. Selección del fluido de trabajo

Donde,

$n$  es un exponente sugerido cuyo valor tiene un rango de 0.375 – 0.38 (Poling, s.f.).

$\Delta H_H$  es la entalpía de vaporización a la temperatura  $T_H$ .

$T_{rH}$  es la temperatura reducida de vaporización definida por  $T_H/T_{crit}$ .

$T_H$  es la temperatura de vaporización [K].

Para la clasificación:

- $\xi > 0$ , el fluido es seco.
- $\xi \approx \infty$ , el fluido es isentrópico. Para fines prácticos se considera un intervalo de  $-0.5 > \xi > 0.5$ .
- $\xi < 0$ , el fluido es húmedo.

La ecuación (3.8), es evaluada con los datos a la entrada de la turbina utilizando cada FT, tomando la temperatura de separación del análisis exergético como la temperatura reducida de vaporización. Siguiendo lo mencionado, se realiza el análisis obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 3. 10.

Tabla 3. 10 Ponderación respecto al grado de humedad

Fluido	Humedad	$\xi$ [J / kg K <sup>2</sup> ]	Ponderación
Neopentano	Seco	1.14	1.00
Isopentano	Seco	0.75	0.98
R365mfc	Seco	0.46	0.97
R141b	Isentrópico	0.50	0.97
R245FA	Isentrópico	0.14	0.95
Butano	Isentrópico	0.09	0.95
R114	Isentrópico	0.08	0.95
R113	Isentrópico	0.03	0.95
R123	Isentrópico	-0.26	0.94
R142b	Isentrópico	-0.34	0.93
Tolueno	Humedo	-0.56	0.92
R11	Humedo	-0.63	0.92
Metanol	Humedo	-1.63	0.87
Etanol	Humedo	-6.95	0.63
Agua	Humedo	-19.90	0.05

### Medidas de seguridad

Como ya se mencionó anteriormente la *standard* 34 de la ASHRAE proporciona información específica sobre los refrigerantes comerciales y los clasifica según su grado de toxicidad e inflamabilidad para su uso basándose en los índices TLV/TWA.



- El índice TLV (*Threshold Limit Value*) contiene información sobre la concentración máxima permisible del refrigerante a la cual una persona puede estar expuesta, expresada en una exposición al gas en un intervalo de tiempo de entre 8 a 12 horas diarias, por cinco días a la semana durante 40 años.
- El índice TWA (*Time Weighted Average*) contiene información sobre la concentración ponderada en el tiempo, expresadas en horas por día (ASHRAE Standard 34, 2007).

El objetivo es asignar un código a cada refrigerante y agruparlos por su grado de seguridad, todo esto para una fácil identificación.

Para los niveles de toxicidad maneja dos clases:

- La clase A son para aquellos con un índice TLV/TWA igual o mayor a 400 ppm (partículas por millón). Baja toxicidad.
- La clase B son aquellos con un índice TLV/TWA igual o menor a 399 ppm. Alta toxicidad.

Para los niveles de inflamabilidad se agrupa en tres clases:

- Clase 1: no propaga la flama.
- Clase 2: baja propagación de flama.
- Clase 3: alta propagación de flama.

La combinación de estos dos parámetros se resume en la Ilustración 3. 8 donde las sustancias más peligrosas son con la clasificación B3 y A1 las sustancias más seguras.



Ilustración 3. 8 Clasificación de fluidos respecto a su grado de inflamabilidad y toxicidad. (ASHRAE Standard 34, 2007)



### 3. Selección del fluido de trabajo

Para obtener una ponderación para cada refrigerante primero se asignará un porcentaje tomando en cuenta el nivel de importancia entre la inflamabilidad y la toxicidad. El ciclo operará en condiciones de ventilación adecuadas, por lo que el riesgo por un alto nivel concentración del refrigerante de existir alguna fuga sería bajo; por lo que el porcentaje de prioridad se le asignará del 30%. El 70% restante se le asignará a la inflamabilidad, ya que el riesgo que durante la operación se genere un incendio si no se tiene un manejo correcto es mayor. En la Tabla 3. 11 se muestra cada fluido con su correspondiente clasificación y ponderación.

*Tabla 3. 11 Ponderación según el nivel de seguridad (ASHRAE Standard 34, 2007)*

Fluido	Seguridad	Ponderación
Agua	A1	1.00
R113	A1	1.00
R114	A1	1.00
R11	A1	1.00
R245FA	B1	0.85
R123	B1	0.85
R365mfc	A2	0.77
R141b	A2	0.77
R142b	A2	0.77
Isopentano	A3	0.53
Neopentano	A3	0.53
Butano	A3	0.53
Etanol	A3	0.53
Metanol	B3	0.38
Tolueno	B3	0.38

### Impacto ambiental

Los gases de efecto invernadero (GEI) se han generado desde hace miles de millones de años de fuente naturales como el vulcanismo, la vegetación y la actividad biológica como es la respiración de las plantas y animales. Sin embargo, desde que el hombre hizo uso de herramientas modernas para la satisfacción de sus necesidades, estos GEI fueron en aumento y llegar al punto de tener una alerta global como la que vivimos hoy en día (INECC, 2015). El uso de algunos refrigerantes también contribuye significativamente al deterioro de la capa de ozono y al efecto invernadero, por tanto, es importante tomar en consideración el grado de impacto que el fluido seleccionado causará al ambiente, a pesar de que el ciclo es cerrado, se requiere cumplir con normas y medidas de seguridad ante posibles fugas.

Para determinar el impacto ambiental se hace referencia a un par de índices que surgieron en documentos internacionales en respuesta a la emergencia el Protocolo de Kyoto y Tratado



de Montreal, que buscan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y evitar la destrucción de la capa de ozono.

- Potencial de Agotamiento de Ozono (ODP, *Ozone Depletion Potential*). Contribución de un gas a la destrucción de la capa de ozono.
- Potencial del Calentamiento Global (GWP, *Global Warming Potential*). Contribución de un gas al efecto invernadero.

### Potencial de Agotamiento de Ozono

El ozono ( $O_3$ ) es una forma alotrópica del oxígeno, que solo en determinadas condiciones de presión y temperatura coexiste. Esta sustancia en fase gaseosa se encuentra presente en la estratosfera y actúa como filtro de los rayos ultravioletas (UV-B) emitidos por el Sol. Los rayos UV-B producen efectos dañinos para diversos organismos vivos en la tierra. En el caso de los seres humanos pueden causar cáncer de piel, cataratas y puede aumentar el grado de probabilidad de enfermedades infecciosas como la malaria.

El hombre debido a su actividad industrial, ha estado continuamente emitiendo productos dañinos para la capa de ozono como es el caso de los CFC. La afectación de dichas sustancias al ozono, procede de una reacción fotoquímica: al incidir los rayos UV sobre la molécula de CFC, se libera un átomo de cloro con un electrón disponible, denominado radical cloro, muy reactivo y con gran afinidad por el ozono y rompe la molécula de ozono para dejar solo moléculas de oxígeno o monóxido de cloro. Se estima que un solo átomo de cloro puede destruir hasta 30,000 moléculas de ozono, por ello es importante disminuir las emisiones de estas sustancias al ambiente (Monroy, 2012).

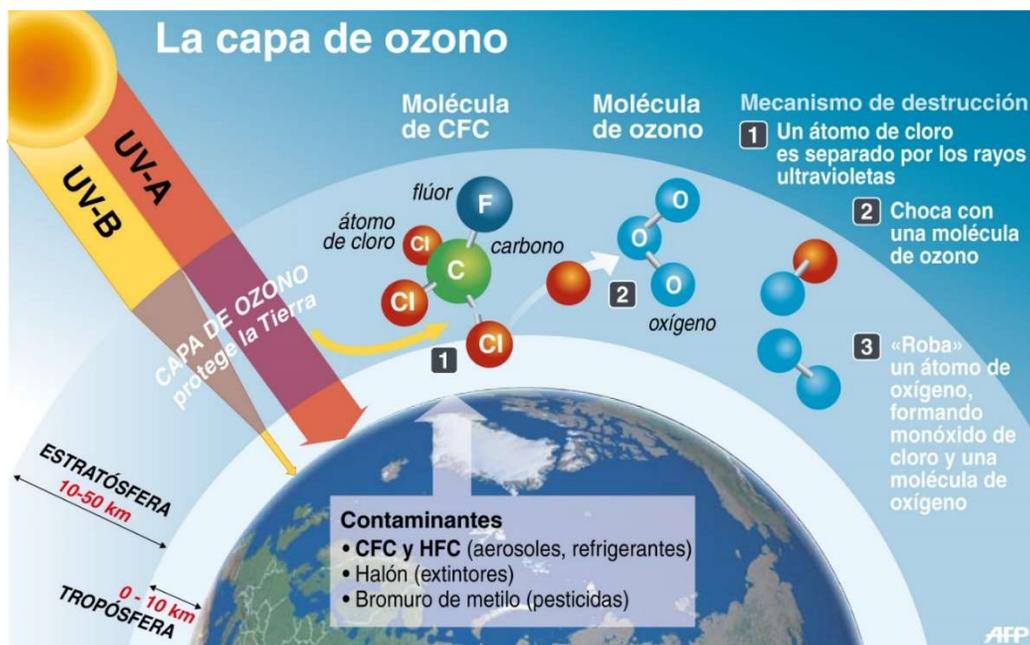


Ilustración 3. 9 Destrucción de ozono (AFP, 2015)



### 3. Selección del fluido de trabajo

Otras consecuencias se ven reflejadas en el incremento del agujero de ozono en la Antártida, zona que debido a la ausencia de radiación solar durante la noche polar, permite las condiciones de bajas temperaturas.

Para poder valorar la capacidad de una sustancia en la destrucción de ozono, se utiliza el indicador ODP por sus siglas en inglés *Ozone Depletion Potential* y está referenciado al CFC-11 que tiene un valor de 1, el más alto valor. Cuanto más alto es el parámetro, más dañino será para la capa de ozono. En la se muestra la ponderación de las sustancias con respecto a este parámetro.

Tabla 3. 12 Ponderación de cada fluido con respecto a su valor en el índice ODP. Fuentes <sup>1</sup>

Fluido	ODP	Ponderación
R245FA	0.00	1.00
R365mfc	0.00	1.00
Isopentano	0.00	1.00
Neopentano	0.00	1.00
Butano	0.00	1.00
Agua	0.00	1.00
R123	0.02	0.95
R142b	0.07	0.29
R141b	0.11	0.17
R113	0.80	0.02
R114	1.00	0.02
R11	1.00	0.02
Etanol	N.E.	-
Metanol	N.E.	-
Tolueno	N.E.	-

Los datos marcados con N. E. no se encontraron valores en la literatura

### Potencial de Calentamiento Global

Los productos que se obtienen de las reacciones químicas como es el caso de la combustión, contribuyen al denominado “efecto invernadero”, los GEI más característicos son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).

El fenómeno de efecto invernadero es cuando los rayos solares UV llegan y calientan la superficie de la tierra, el planeta emite radiación térmica (infrarroja o de larga longitud de onda) para redireccionarla hacia la atmósfera, los GEI presentes en la atmósfera son permeables a la radiación solar e impermeables a la radiación térmica por lo que esta radiación de nuevo es reflejada a la superficie terrestre y de nuevo la calienta.

<sup>1</sup> (Klein, 1999); (Dincer, et al., 2014); (Zhejiang se China fluorine chemical Co., s.f.); (Linde, 2006); (Taiao, s.f.).



Las consecuencias de este efecto son diversas y algunas de ellas son: se ha visto un aumento en la magnitud de los desastres naturales así como un aumento en la temperatura del agua de los océanos, lo que puede destruir vida marina debido a las propiedades conductivas del agua. También un problema importante es el derretimiento de los glaciares y provoca una elevación del nivel del mar y por lo que áreas terrestres bajas desaparecerían.



Ilustración 3. 10 Procesos del efecto invernadero (UNEP-GRID-Arendal, 2015)

Como se puede observar en la Ilustración 3. 11, los países que desechan la mayor cantidad de GEI al ambiente son China, Estados Unidos, India, Rusia, Brasil países que su industria se basa en la quema de combustibles fósiles.

Existen dos factores que ayudan a cuantificar el impacto que tienen los gases de efecto invernadero, uno es la concentración de los gases que hay en la atmósfera y se miden por partes por millón; el otro es el tiempo que estas concentraciones permanecen en la atmósfera, que van desde unos pocos años a miles de años.

El GWP (*Global Warming Potential*) es un índice que representa el tiempo que permanece el gas en la atmósfera, en promedio y capacidad con que absorbe energía, esto es una relación entre el efecto de un GEI por unidad de masa y el efecto que produce el CO<sub>2</sub> por unidad de masa, el cual tiene un valor de GWP de 1. Los gases con un potencial de calentamiento atmosférico superior absorben más energía, por unidad de masa, que los gases con un GWP inferior, y por lo tanto contribuyen más al calentamiento de la Tierra.

### 3. Selección del fluido de trabajo

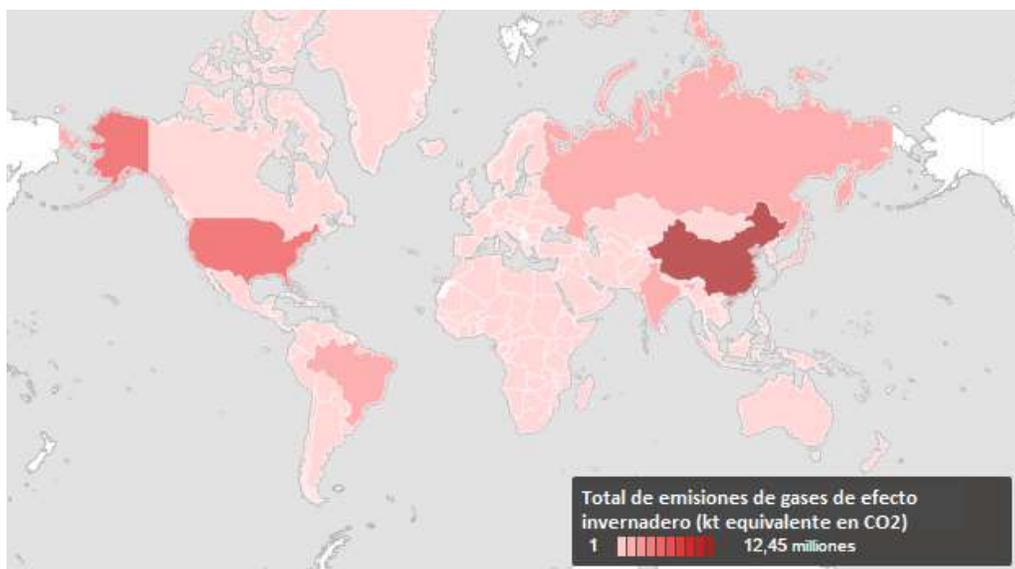


Ilustración 3. 11 Distribución de emisiones de GEI en el mundo (El Banco Mundial, BIRF - AIF, 2015)

Retomando el anterior criterio se realiza la ponderación para cada fluido mostrado en la Tabla 3. 13. Los datos obtenidos del GWP en todos los casos son para un período de 100 años con respecto al CO<sub>2</sub>. Para los fluidos con una ponderación nula se debe a que la diferencia entre el valor referencia de ponderación con respecto a los valores de estos fluidos es muy grande, por lo que su ponderación tiende a cero.

Tabla 3. 13 Ponderación para cada fluido en base a su valor del índice GWP. Fuentes<sup>2</sup>

Fluido	GWP	Ponderación
Agua	0.00	1.00
Tolueno	2.70	0.96
Metanol	2.80	0.93
Butano	4.00	0.65
Etanol	5.50	0.47
Isopentano	20.00	0.13
R123	77.00	0.03
R141b	725.00	0.00
R365mfc	794.00	0.00
R245FA	1030.00	0.00
R142b	2310.00	0.00
R11	4750.00	0.00
R113	6130.00	0.00
R114	10000.00	0.00
Neopentano	N.E.	-

<sup>2</sup> (GREENHOUSE GAS PROTOCOL, 2007); (Bauer, et al., 2014); (Intergovernmental Panel on Climate Change, s.f.).



### 3.5.3 Construcción de la matriz de decisión

Para la construcción de la matriz de decisión se conjuntan las ponderaciones correspondientes a cada parámetro. En la parte superior se muestran los porcentajes de importancia de cada parámetro y afectan en las ponderaciones de cada parámetro, en otras palabras los resultados obtenidos para cada ponderación de cada parámetro se multiplican por este factor. En la parte derecha se muestra la puntuación global la cual es la suma de todas las ponderaciones.

Tabla 3. 14 Matriz de decisión

		Importancia	0.2500	0.2143	0.1786	0.1429	0.1071	0.0357	0.0357	0.0357	
Tipo	Fluido	Inflamabilidad & Toxicidad	Humedad	Eficiencia	ODP	GWP	Peso Molecular	Punto de Ebu.	Calor Latente	Puntuación	
HC	Butano	0.1325	0.2036	0.1532	0.1429	0.0696	0.0111	0.0196	0.0054	0.7378	
INOR	Agua	0.2500	0.0107	0.1786	0.1429	0.1071	0.0036	0.0029	0.0357	0.7314	
HFC	R245FA	0.2125	0.2036	0.0852	0.1429	0.0000	0.0257	0.0104	0.0025	0.6827	
HC	Isopentano	0.1325	0.2100	0.1520	0.1429	0.0139	0.0139	0.0079	0.0046	0.6777	
HC	Neopentano	0.1325	0.2143	0.1561	0.1429	-	0.0139	0.0129	0.0039	0.6764	
HFC	R365mfc	0.1925	0.2079	0.0900	0.1429	0.0000	0.0282	0.0061	0.0025	0.6700	
HCFC	R123	0.2125	0.2014	0.0590	0.1357	0.0032	0.0289	0.0079	0.0021	0.6507	
HCFC	R142b	0.1925	0.1993	0.1181	0.0414	0.0000	0.0193	0.0357	0.0029	0.6091	
INOR	Metanol	0.0950	0.1864	0.1629	-	0.0996	0.0071	0.0043	0.0161	0.5714	
CFC	R114	0.2500	0.2036	0.0639	0.0029	0.0000	0.0325	0.0161	0.0018	0.5707	
CFC	R113	0.2500	0.2036	0.0558	0.0029	0.0000	0.0357	0.0054	0.0018	0.5551	
CFC	R11	0.2500	0.1971	0.0465	0.0029	0.0000	0.0261	0.0086	0.0025	0.5337	
HCFC	R141b	0.1925	0.2079	0.0668	0.0243	0.0000	0.0221	0.0071	0.0032	0.5240	
HC	Tolueno	0.0950	0.1971	0.0898	-	0.1029	0.0175	0.0029	0.0050	0.5102	
INOR	Etanol	0.1325	0.1350	0.1619	-	0.0504	0.0089	0.0036	0.0121	0.5044	

En la matriz se observa que el fluido con mayor puntaje es el Butano, seguido por el agua y en tercer lugar el R245fa. Los fluidos que mostraron menor puntuación fueron el etanol y tolueno.



### 3. Selección del fluido de trabajo

#### 3.6 Conclusión

Se concluye que el fluido con el mejor desempeño en su evaluación en el CBEI es el butano. No mostró la máxima eficiencia del conjunto de fluidos, pero es aceptable con un 12.87 % y no muy alejada del valor máximo obtenido por el agua con un 15.00 %. Éste fluido muestra una condición de cuidado debido a su alta inflamabilidad con una clasificación A3, por lo que se tendrá que poner delicada atención a las medidas de seguridad al ser una sustancia que propaga flama. También mostró favorables condiciones en los aspectos ambientales con un valor de ODP nulo y un valor de GWP de 4 años, aunque se recalca que el ciclo será cerrado, se tiene que poner atención a las condiciones de sellado en los componentes para evitar fugas. Un último punto importante para este fluido es que presenta un comportamiento isentrópico en el proceso de expansión en la turbina, por lo que el riesgo de condensación dentro de la misma será casi nulo que beneficia en no tener problemas de vibraciones, en los periodos de mantenimiento, al factor de planta y en aspectos económicos.

El segundo fluido con mayor puntaje fue el agua; mostró condiciones buenas para el CBEI, pero este sólo se considera como una referencia, ya que aunque obtuvo la mayor eficiencia exérgica con un 15.00 %, su contraparte es que un fluido húmedo y no deseable en el ciclo. El ciclo Rankine simple precisamente opera bajo vapor de agua, sus instalaciones y equipos son de gran tamaño, manejan grandes gastos de agua y para evitar el condensado en la turbina utilizan recalentadores a la entrada de este dispositivo. También otra desventaja del agua es que su calor específico es elevado comparándolo con los fluidos orgánicos y como se sabe el uso de recursos geotérmicos de baja y media entalpia no superan los 150 °C y es por ello que el uso industrial para ellos es escaso aun, razón principal por lo que se descarta esta opción.

Para el tercer fluido contemplado es el R245fa, mostró una eficiencia exérgica del 7.16 %, casi la mitad del máximo valor. Las bondades de esta sustancia es que es un fluido seco, lo cual ubica también en un fluido aceptable para las condiciones del CBEI. Otro aspecto importante es que en la clasificación de inflamabilidad y toxicidad lo ubica en el tipo B1, más seguro que el butano al no propagar flama pero es tóxico, por lo que se tendría que poner más atención en aspectos de ventilación en las instalaciones y sellado en los equipos para evitar fugas. En los aspectos ambientales, muestra condiciones favorables contra el agotamiento de la capa de ozono con un índice ODP nulo, pero tiene un muy elevado valor de GWP, por lo que tiene una contribución importante al efecto invernadero.

Como conclusión general, se propone la utilización como fluido de trabajo para el CBEI, el butano y como una segunda alternativa el R245fa.



## 4. Análisis exergético

### Introducción

Se mencionó en el capítulo anterior la necesidad de disminuir la exergía destruida con el objetivo de incrementar la eficiencia del CBEI. En el postulado de la segunda ley de la termodinámica se introduce una variable que cuantifica el desorden molecular o aleatoriedad molecular que se genera en un sistema llamada “entropía”. La entropía de la materia depende en gran parte del estado de agregación en el que se encuentre, en estado gaseoso las moléculas tienen mayor libertad de movimiento debido a su alto contenido de energía cinética, por lo que hay un mayor desorden y se vuelve complicado la predicción de la ubicación de sus moléculas. De forma contraria sucede con los sólidos, sus moléculas no tienen libertad de movimiento por lo que su entropía es baja.

En las máquinas térmicas su objetivo es la transformación de la energía en tránsito en energía útil. El proceso se lleva a cabo aprovechando una fuente de calor que debido a su alta temperatura hay un gran desorden molecular y con ayuda de la máquina térmica se convierte en energía ordenada en forma de trabajo.

Una medida de la energía útil que se puede obtener de un dispositivo o máquina térmica es mediante la exergía que contiene información acerca de las irreversibilidades del sistema y toma en cuenta la calidad de la energía que pretende ser aprovechada.

Por tanto en este capítulo se procede a llevar a cabo un análisis exergético equipo por equipo utilizando como base los dos fluidos seleccionados para identificar en que equipo se presenta la mayor destrucción de exergía y su influencia en la eficiencia del ciclo.





#### 4.1 Termodinámica del butano en el CBEI

En la Ilustración 4. 1 se muestra el diagrama T-S del CBEI utilizando como fluido de trabajo butano y en la Tabla 4. 1 se muestra los datos termodinámicos obtenidos del análisis. La fracción de vapor obtenido durante el *flasheo* es del 48.79% y esta fracción puede ser controlada con la apertura en la placa orificio. También se observa que durante la expansión en la turbina, el fluido se encuentra en vapor sobrecalentado, y como ya se había mencionado en el anterior capítulo, es muy conveniente esta condición en cuestión de costos, mantenimiento y desempeño.

Tabla 4. 1 Datos termodinámicos con butano

Estado	T [°C]	P [Mpa]	h [kJ/kg]	S [kJ/kg K]	x
1	137.0000	2.9653	589.6654	2.1208	0
2	100.2952	1.5347	589.6654	2.1456	0.4879
3	100.2952	1.5347	463.9336	1.8090	0
4	100.2952	1.5347	721.6207	2.4990	1
5	63.8452	0.3340	689.9889	2.5952	V.S
6	35.5904	0.3340	285.6928	1.2933	0
7	36.6244	1.5347	288.9847	1.2970	L.C.
8	70.9045	1.5347	378.5717	1.5711	L.C.
9	72.4113	2.9653	382.8217	1.5754	L.C.

Para obtener una potencia neta de 10 kW como está planteado en su diseño el CBEI, se necesitaría un flujo másico de 1.02 kg/s de butano. La potencia bruta utilizando esta sustancia es de 15.73 kW, donde 5.73 kW está destinado para usos propios.

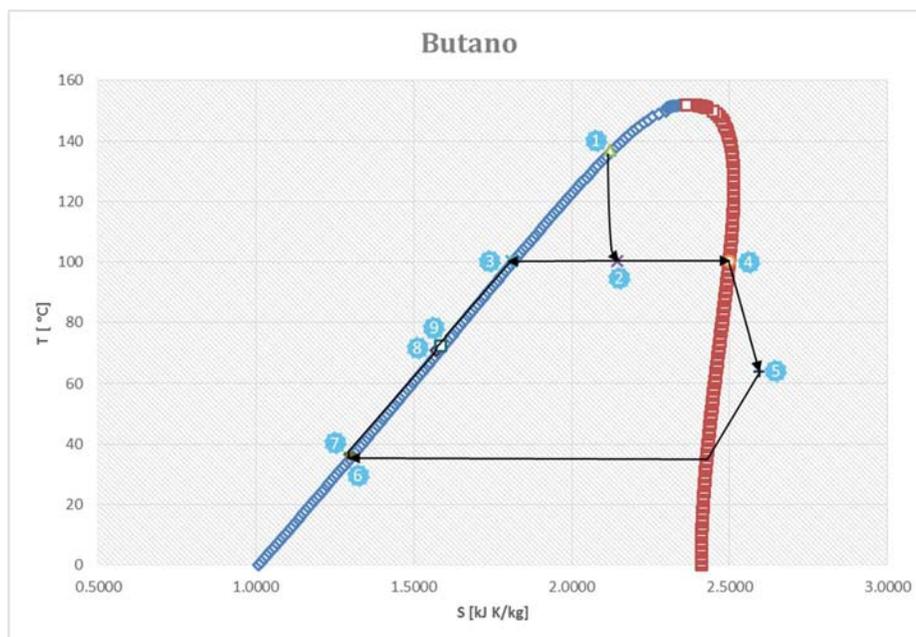


Ilustración 4. 1 Diagrama T-S del CBEI con butano

#### 4. Análisis exergético

#### 4.2 Termodinámica del R245fa en el CBEI

Para el caso del R245fa con base en los datos mostrados en la Tabla 4. 2 del análisis termodinámico se observa también un comportamiento deseable a la salida de la turbina donde el flujo se encuentra en vapor sobrecalentado. También, del análisis se define que se requiere un flujo másico de 1.85 kg/s para una generación neta de 10 kW. La potencia bruta obtenida es de 14.24 kW donde 4.24 kW son utilizados para usos propios.

Tabla 4. 2 Datos termodinámicos con R245fa

Estado	T [°C]	P [Mpa]	h [kJ/kg]	S [kJ/kg K]	x
1	137.0000	2.6756	403.7276	1.5903	0
2	98.4283	1.2210	403.7276	1.6030	0.4882
3	98.4283	1.2210	337.3133	1.4243	0
4	98.4283	1.2210	473.3403	1.7903	1
5	62.9462	0.2180	457.4747	1.8387	V.S.
6	35.8566	0.2180	246.9613	1.1610	0
7	36.5433	1.2210	248.1394	1.1624	L.C.
8	69.4219	1.2210	293.7747	1.3023	L.C.
9	70.6504	2.6756	295.6197	1.3042	L.C.

La fracción de vapor disponible para la entrada de la turbina en este caso es del 48.82%, valor muy parecido al obtenido con el butano.

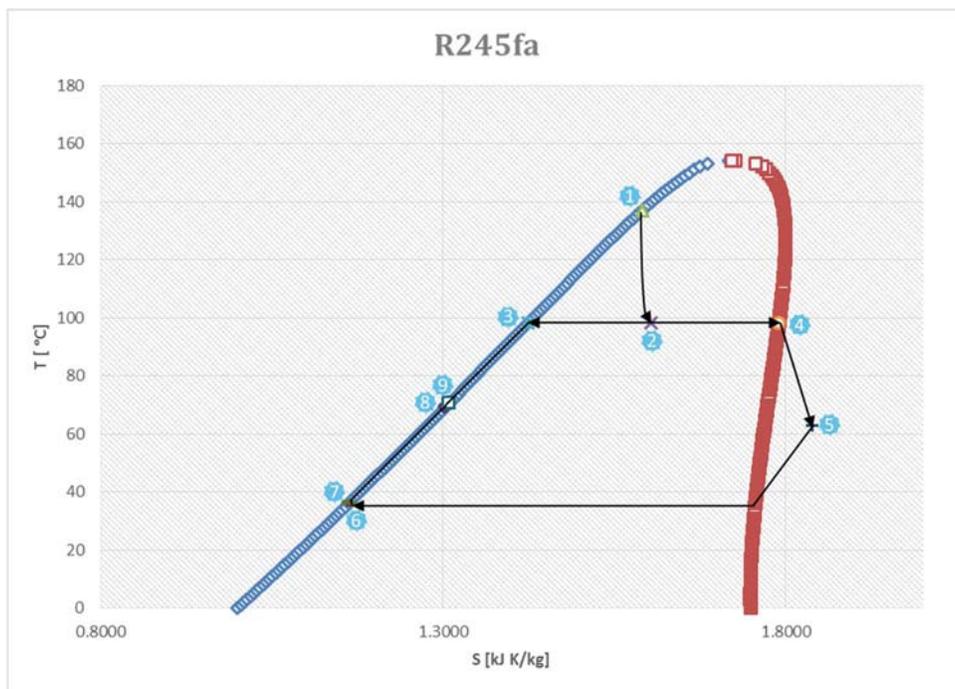


Ilustración 4. 2 Diagrama T-S del CBEI con R245fa



### 4.3 Balance de exergía

La variable exergía, cuantifica el máximo trabajo que un dispositivo o sistema puede entregar sin violar cualquier ley de la termodinámica, dicho trabajo está referido a un estado muerto o en otras palabras, un estado energéticamente nulo, por lo que la exergía no es exclusivo solamente del sistema. La exergía no puede aumentar en un sistema real con propiedades definidas, pero si puede aumentar la exergía destruida, de modo que se pierde capacidad de producir trabajo. Cualquier cosa que genere entropía siempre destruye exergía (A. Cengel & A. Boles, s.f.).

A continuación se llevará a cabo un balance de exergía en el CBEI quipo por equipo utilizando las dos sustancias seleccionadas para identificar en cuál de ellos se presenta la mayor destrucción de exergía y determinar el impacto que tiene en la eficiencia del ciclo.

#### Balance de exergía para sistemas de flujo estacionario

La transferencia de exergía se puede transportar en tres formas: calor, trabajo y flujo másico. En la mayoría de los procesos reales, el régimen que presentan estos es de flujo estacionario lo que significa que sus propiedades no son dependientes de variaciones en el tiempo, por lo que la exergía que entra al sistema en todas las formas posibles, debe ser igual la exergía que sale más la destruida, esto para un sistema abierto. En términos matemáticos la exergía se denota con la letra "X" (A. Cengel & A. Boles, s.f.).

$$X_{entrada} = X_{salida} + X_{destruida} \quad (4.0)$$

La exergía de entrada y salida incluye las tres formas posibles de transferencia de exergía, de forma específica son:

- **Calor (q):**  $X_{calor} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) q;$  (4.1)

Donde q – transferencia de calor a la temperatura T y  $T_0$  – temperatura del estado muerto.

- **Trabajo (w):**  $X_{trabajo} = w;$  (4.2)

- **Masa (m):**  $X_{masa} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz;$  (4.3)

En estado estacionario las energías cinéticas y potenciales son insignificantes, por lo tanto:  $X_{masa} = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$

El estado muerto se define como aquel estado que se encuentra en equilibrio. El ambiente es un estado muerto y se toma valores estándar de  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  y  $P = 1 \text{ atm}$ .

A continuación se realiza el balance exerético en cada equipo que componen al CBEI siguiendo el diagrama de la Ilustración 2. 5 y que se muestra en la Tabla 4. 3.



Tabla 4. 3 Balance de exergía por dispositivo.

Dispositivo	Destrucción de Exergía	
Intercambiador de calor	$\left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) Q_{ent} + (h_9 - h_1) - T_0(s_9 - s_1)$	(4.4)
Válvula de estrangulamiento	$-T_0(s_1 - s_2)$	(4.5)
Separador	$(h_2 - T_0s_2) - x(h_4 - T_0s_4) - y(h_3 - T_0s_3)$	(4.6)
Turbina	$x[(h_4 - h_5) - T_0(s_4 - s_5)] - w_t$	(4.7)
Condensador	$x[(h_5 - h_6) - T_0(s_5 - s_6)] - \left(1 - \frac{T_0}{T_6}\right) Q_{sal}$	(4.8)
Bomba 1	$w_{b1} + (h_8 - h_9) - T_0(s_8 - s_9)$	(4.9)
Bomba 2	$w_{b2} + x[(h_6 - h_7) - T_0(s_6 - s_7)]$	(4.11)
Mezclador	$y(h_3 - T_0s_3) + x(h_7 - T_0s_7) - (h_8 - T_0s_8)$	(4.12)

Dónde: x- fracción de vapor; y – fracción de liquido

Con los datos obtenidos del análisis termodinámico correspondiente a cada fluido de trabajo mostrados en la Tabla 4. 1 y en la Tabla 4. 2 que están basados en los datos técnicos mostrados en la Tabla 3. 2 y sustituyendo en los balances de exergía por equipo se obtienen los siguientes resultados mostrados en la Tabla 4. 4. Se presentan los datos numéricos de la cantidad de exergía destruida para los dos fluidos de trabajo seleccionados en cada equipo. Hay una diferencia cerca de 3 kW de exergía destruida total entre ambos fluidos, teniendo el mayor valor el butano, que recordando tuvo también mayor eficiencia que el R245fa. En el caso del separador no se obtuvo ninguna exergía destruida en ambos casos, esto debido a que en este dispositivo las condiciones de temperatura y presión son la misma para las entradas y las salidas.

Tabla 4. 4 Datos de destrucción de exergía por equipo

Dispositivo	R245fa [kW]	Butano [kW]
Intercambiador	12.3235	12.4398
Valvula	7.0054	7.5413
Separador	0.0000	0.0000
Turbina	13.0080	14.2686
Condensador	1.0534	1.2205
Bomba 1	1.0351	1.3121
Bomba 2	0.3582	0.5520
Mezclador	3.2742	3.6201
<b>Total</b>	<b>38.0577</b>	<b>40.9544</b>



En la Ilustración 4. 3 se muestra la aportación de la exergía destruida en cada equipo utilizando R245fa. En el equipo que se observa mayor porcentaje de destrucción de exergía es en la turbina con un 34.18% seguido por el intercambiador de calor con un 32.38%; los dispositivos que mostraron una menor aportación fueron las bombas y el condensador.

### Exergía Destruída R245fa

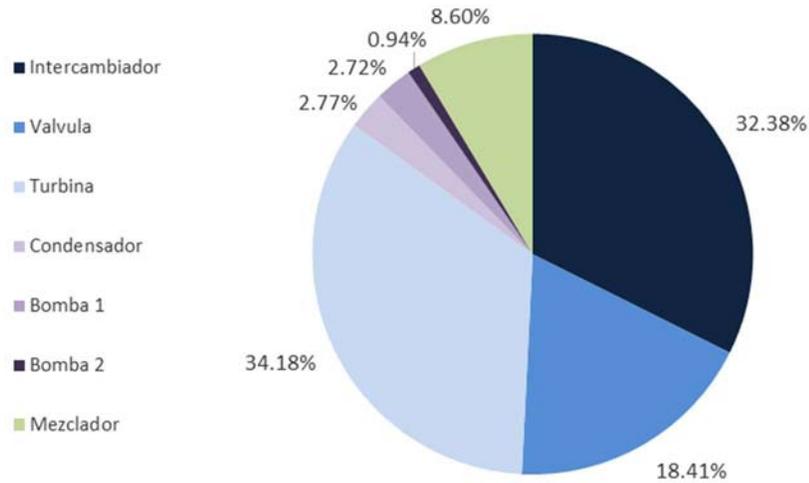


Ilustración 4. 3 Distribución de exergía destruida con R245fa

De igual manera en la Ilustración 4. 4 se observa la distribución de exergía destruida pero ahora utilizando butano, el dispositivo que presenta mayor destrucción de exergía es la turbina con un 34.84% seguido por el intercambiador de calor con 30.37%. En este resultado se observa un pequeño incremento en el porcentaje de las bombas y en el mezclador en comparación con lo obtenido en el R245fa.

### Exergía Destruída Butano

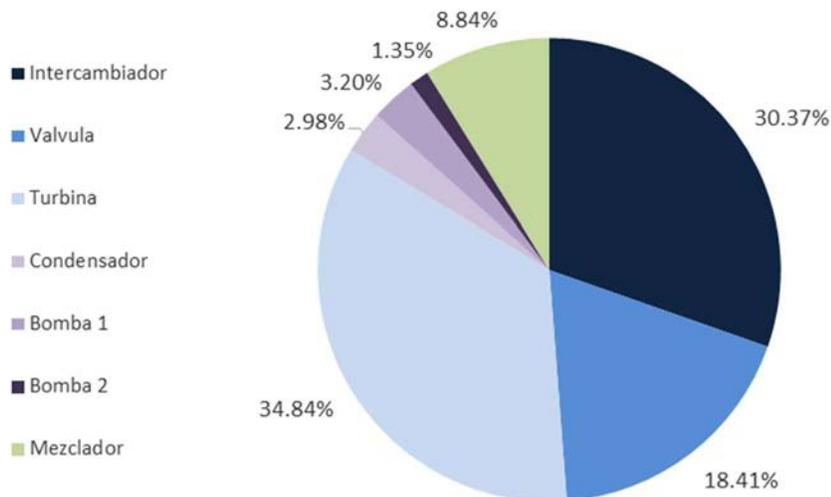


Ilustración 4. 4 Distribución de exergía destruida con butano



#### 4. Análisis exergético

Para ambos casos, en la válvula de estrangulamiento se observa aportaciones muy similares en kW y su contribución de exergía destruida es considerable, esto se debe a que en este dispositivo se produce la evaporación del fluido de trabajo. Recapitulando, en ambos casos la mayor destrucción de exergía está contenida en la turbina y en el intercambiador de calor, pero en la literatura se describe condiciones distintas a las obtenidas, la mayor destrucción se origina en el intercambiador de calor y no en la turbina, por lo que se procede a llevar a cabo un análisis detallado en estos equipos y observar el porqué de esta diferencia, así mismo determinar la sensibilidad que algunos de sus parámetros de estos equipos tienen con respecto a la eficiencia exergética del ciclo.

#### 4.4 Impacto de la exergía destruida

##### Turbina

Este dispositivo tiene la mayor importancia en el ciclo ya que es en donde se lleva a cabo el proceso de transformación de energía. Entre los parámetros importantes que incluye en su buen desempeño se identifican dos y son la eficiencia isentrópica y la presión de condensación.

##### Eficiencia isentrópica

Este parámetro cuantifica el desempeño del dispositivo contemplando datos reales y teóricos. Generalmente depende de su diseño y de las condiciones de operación del ciclo. La eficiencia isentrópica se define como el trabajo real entre el trabajo considerando que el proceso se lleva a cabo isentrópicamente (A. Cengel & A. Boles, s.f.):

$$\eta_T = \frac{\text{Trabajo real de la turbina}}{\text{Trabajo isentrópico de la turbina}} = \frac{w_a}{w_s} \quad (4.13)$$

Considerar que el proceso se lleva a cabo isentrópicamente es considerar que toda la energía que entra se convierte en trabajo útil, condición que físicamente no es posible debido a las irreversibilidades del propio sistema sin embargo, otorga una referencia y como objetivo el aproximarse a dicho valor cada vez más.

Se pretende evaluar la importancia de la eficiencia isentrópica en la contribución de la exergía destruida de forma cuantitativa así como observar el comportamiento de la eficiencia del ciclo y obtener resultados para su atención. A continuación se presentan los resultados obtenidos para diversas eficiencias isentrópicas de la turbina. En la Tabla 4. 5 y Tabla 4. 6 se presenta los resultados de la variación de la eficiencia isentrópica de la turbina con su correspondiente destrucción de exergía así como su porcentaje de contribución en el total de la exergía destruida utilizando los dos fluidos de trabajo. También se presentan los resultados de la eficiencia exergética y la destrucción de exergía total. A medida que la



turbina es más eficiente, la exergía destruida disminuye y la eficiencia exerética aumenta en ambos casos.

Tabla 4. 5 Análisis exerético en la turbina con butano (eficiencia isentrópica)

$\eta_T$	$E_{dT}$ [kW]	Contribución	$\eta_{\text{Ciclo}}$	$E_{dTotal}$ [kW]
50%	14.2615	34.84%	12.87%	40.9350
53%	13.4255	33.54%	14.11%	40.0234
56%	12.5871	32.18%	15.36%	39.1118
59%	11.7462	30.75%	16.60%	38.2002
62%	10.9029	29.24%	17.85%	37.2886
65%	10.0572	27.65%	19.09%	36.3770
68%	9.2089	25.97%	20.34%	35.4654
71%	8.3581	24.19%	21.58%	34.5538
74%	7.5047	22.31%	22.82%	33.6422
77%	6.6489	20.31%	24.07%	32.7306
80%	5.7904	18.20%	25.31%	31.8190
83%	4.9293	15.95%	26.56%	30.9074
86%	4.0657	13.55%	27.80%	29.9958
89%	3.1993	11.00%	29.05%	29.0842

Tabla 4. 6 Análisis exerético en la turbina con R245fa (eficiencia isentrópica)

$E_{dT}$ [kW]	Contribución	$\eta_{\text{Ciclo}}$	$E_{dTotal}$ [kW]	$\eta_T$
13.0081	34.18%	7.16%	38.0619	50%
12.2453	32.89%	7.78%	37.2331	53%
11.4803	31.54%	8.41%	36.4042	56%
10.7132	30.11%	9.03%	35.5754	59%
9.9438	28.62%	9.65%	34.7465	62%
9.1721	27.04%	10.28%	33.9177	65%
8.3983	25.38%	10.90%	33.0888	68%
7.6221	23.63%	11.53%	32.2600	71%
6.8437	21.77%	12.15%	31.4311	74%
6.0630	19.81%	12.78%	30.6023	77%
5.2800	17.73%	13.40%	29.7734	80%
4.4947	15.53%	14.03%	28.9446	83%
3.7070	13.18%	14.65%	28.1157	86%
2.9170	10.69%	15.28%	27.2869	89%

Utilizando butano como fluido de trabajo se observa que cada 3% que incrementa la eficiencia isentrópica de la turbina, la eficiencia del ciclo aumenta en promedio 1.24%. Para el caso del R245fa cada aumento del 3%, aumenta en promedio 0.62% la eficiencia del ciclo.

En la Ilustración 4. 5 se observa la distribución de la contribución de destrucción de exergía generada por la turbina y por el intercambiador de calor con a distintas eficiencias isentrópicas. A medida que es más eficiente la turbina, su contribución en el total disminuye



#### 4. Análisis exergético

y la contribución en porcentaje del intercambiador de calor aumenta. Este mismo comportamiento se observa con el R245fa.

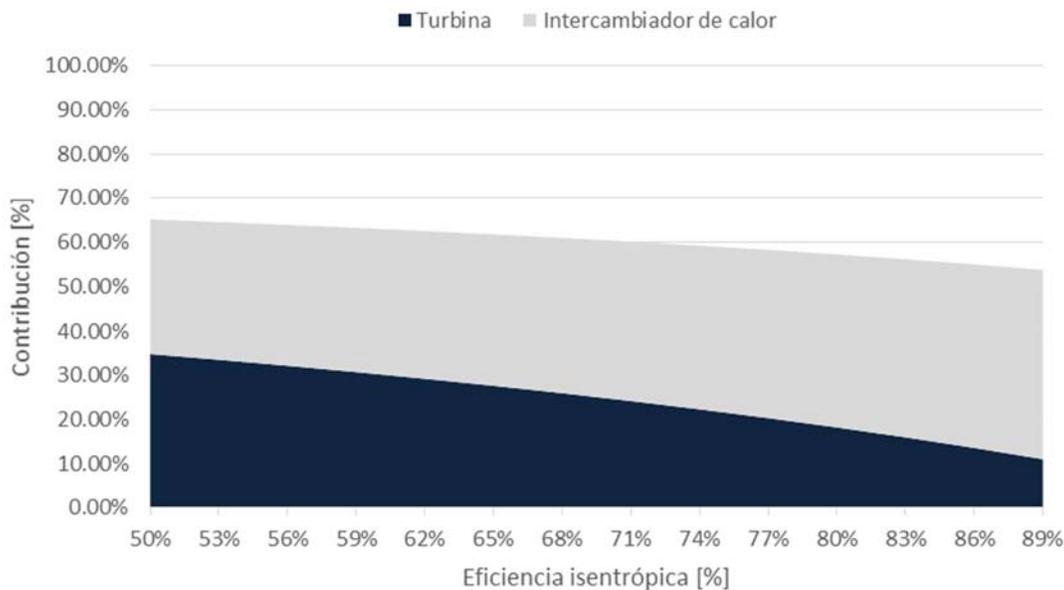


Ilustración 4. 5 Contribución de exergía destruida con butano (eficiencia isentrópica)

La eficiencia isentrópica en una turbina se considera desde su diseño pero se obtiene realmente ya en operación. Es dependiente principalmente del tipo de turbina, de la velocidad y del diámetro del rotor.

#### Presión de condensación

A la salida de la turbina se obtiene una mezcla de líquido - vapor en el caso de los ciclos Rankine simples, pero en el CBEI se tiene vapor sobrecalentado, esto es por el tipo de fluido utilizado y que a través del sistema de enfriamiento se obtiene el flujo totalmente en líquido para su recirculación en el ciclo. En el condensador se lleva a cabo un proceso isobárico por lo que la presión de salida de la turbina es la misma que la del condensador. A medida que la diferencia de presiones entre la presión de la entrada de la turbina y la salida es más grande, mayor es el trabajo.

Es claro que a medida que sea mayor el trabajo, incrementará la eficiencia del ciclo, pero que sucede con la exergía destruida, en la

Tabla 4. 7 se muestran los resultados a distintas presiones de condensación y se corrobora que a presiones bajas la eficiencia es alta, esto para ambos fluidos de trabajo. En el caso de la exergía destruida también aumenta a medida que la presión disminuye.

Utilizando el R245fa como fluido de trabajo, cada 0.016 Mpa de aumento en la presión de condensación, la eficiencia del ciclo aumenta en promedio 0.4% mientras que utilizando



butano, cada 0.022 Mpa de aumento en la presión, la eficiencia del ciclo aumenta en promedio 0.8%.

Tabla 4. 7 Análisis exergético en la turbina (presión de condensación)

	$P_{cond}$ [Mpa]	$E_d$ [kW]	Contribución	$E_{dTotal}$ [kW]	$\eta_{ciclo}$
R245fa	0.218	13.0081	34.18%	38.0619	7.16%
	0.234	12.4160	33.74%	36.7986	6.73%
	0.251	11.8332	33.28%	35.5587	6.30%
	0.267	11.3226	32.84%	34.4758	5.93%
	0.284	10.8153	32.38%	33.4035	5.56%
	0.300	10.3674	31.94%	32.4596	5.23%
Butano	0.334	14.2615	34.84%	40.9350	12.87%
	0.356	13.5941	34.39%	39.5256	12.00%
	0.378	12.9708	33.94%	38.2132	11.19%
	0.400	12.3865	33.49%	36.9869	10.42%
	0.422	11.8370	33.03%	35.8370	9.70%
	0.444	11.3185	32.57%	34.7558	9.01%

En la Ilustración 4. 6 se aprecia la contribución de exergía destruida por parte de la turbina y el intercambiador de calor utilizando butano a distintas presiones de condensación. Se observan contribuciones muy similares, pero a medida que la presión aumenta, la contribución por la turbina disminuye y la contribución del intercambiador aumenta, esto para ambos fluidos.

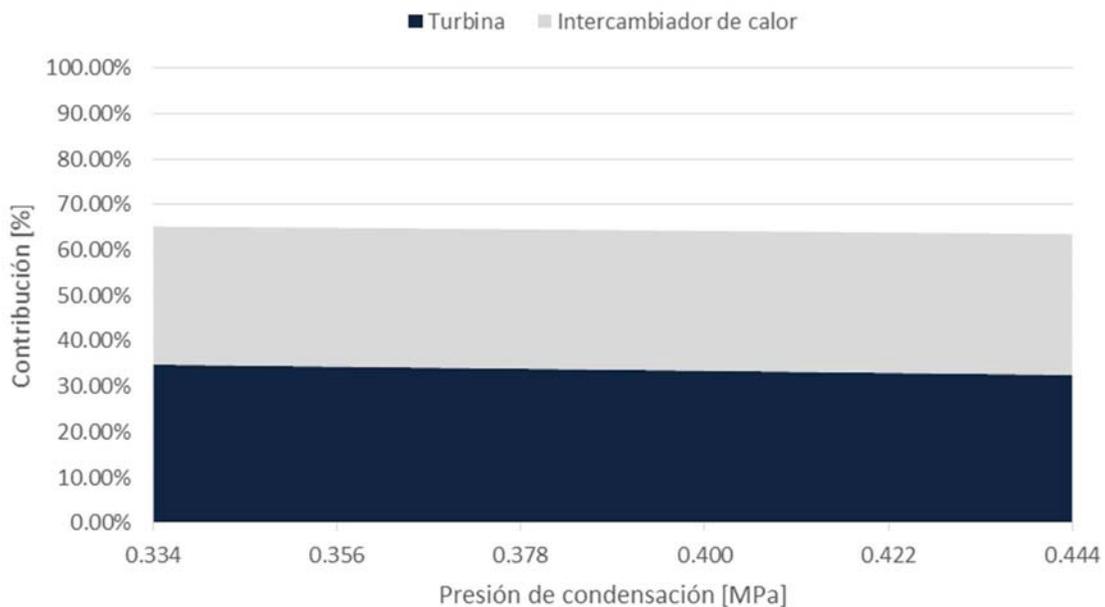


Ilustración 4. 6 Contribución de exergía destruida con butano (presión de condensación)

La presión de condensación depende de dos parámetros termodinámicos, la variación de temperaturas entre el fluido caliente y el frío y la caída de presión en el condensador. Estos parámetros dependen del tipo de condensador.

### Intercambiador de calor

En este dispositivo debido a la adición de calor al fluido de trabajo se genera naturalmente un aumento en la entropía, por lo que en este dispositivo es donde se esperaría siempre una alta destrucción de exergía. El desempeño de un intercambiador involucra un parámetro que es conocido como acercamiento o *pinch point*, que contiene la información acerca de la diferencia de temperaturas entre flujos. Mientras más pequeño sea el acercamiento, habrá un mejor aprovechamiento de la fuente de calor y depende del tipo y diseño del equipo.

Para el caso del CBEI, se seleccionó un intercambiador de placas planas (ver capítulo 2) debido a que tienen un acercamiento de 3 °C y ocupa un menor espacio comparado si se utilizará un intercambiador de tubo y coraza. Todo lo mencionado anteriormente es desde un punto de vista termodinámico, pero también existen ventajas físicas como facilidad en mantenimientos y acciones preventivas contra la corrosión.

Tabla 4. 8 Análisis exergético en el intercambiador de calor (acercamiento)

	Acercamiento [ °C]	$E_d$ [kW]	Contribución	$E_{dTotal}$ [kW]	$\eta_{ciclo}$	$x$
R245fa	1	13.7006	33.32%	41.1204	7.58%	0.5178
	2	13.0029	32.86%	39.5734	7.37%	0.5029
	3	12.3275	32.39%	38.0619	7.16%	0.4882
	4	11.6735	31.91%	36.5844	6.95%	0.4738
	5	11.0404	31.42%	35.1395	6.74%	0.4595
Butano	1	13.9340	31.38%	44.4103	13.72%	0.5200
	2	13.1716	30.88%	42.6492	13.29%	0.5038
	3	12.4373	30.38%	40.9350	12.87%	0.4879
	4	11.7298	29.87%	39.2649	12.46%	0.4723
	5	11.0480	29.35%	37.6363	12.05%	0.4570

En la Tabla 4. 8 se muestra los datos a distintos acercamientos con sus correspondientes valores de exergía destruida, contribución de ésta en el total, eficiencia exergética, exergía destruida del ciclo y por último la calidad del flujo obtenido por el efecto *flash*. De forma numérica se respalda lo antes mencionado y con referencia a ambos fluidos se determina que a medida que el acercamiento es cada vez menor, la eficiencia exergética del ciclo aumenta pero también lo hace la exergía destruida, por lo que este fenómeno no se puede librar en este equipo. El acercamiento impacta en la cantidad de vapor que también a medida que el acercamiento es menor, la calidad de vapor aumenta lo que representa un mayor trabajo en la turbina.



Utilizando el R245fa, cada unidad de acercamiento representa un aumento o disminución en promedio del 0.21% de eficiencia exergética mientras que para el butano representa en promedio el 0.42%.

En la Ilustración 4. 7 se observa la aportación de exergía destruida entre el intercambiador de calor y la turbina utilizando butano. En este caso también las aportaciones son muy similares con respecto a la variación del acercamiento en donde la turbina representa la mayor aportación. Esto ocurre también para el R245fa.

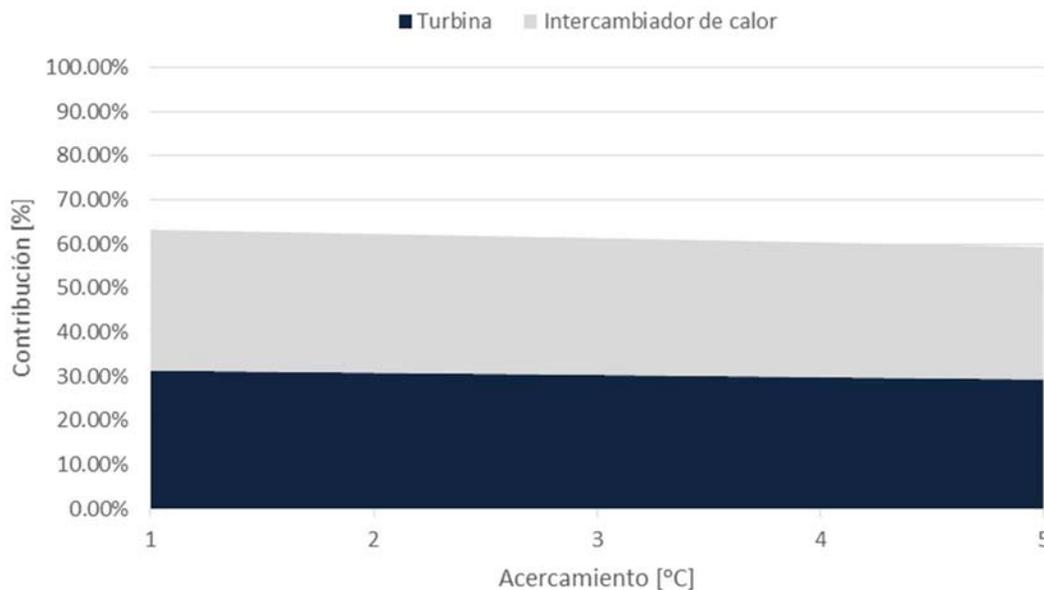


Ilustración 4. 7 Contribución de exergía destruida con butano (acercamiento)

#### 4.5 Conclusiones

Con base en el análisis exergético se identifican los puntos en el ciclo donde se presenta la mayor destrucción de exergía, con da la bases para un análisis económico de lo que representa monetariamente la energía que no se aprovecha y buscar alternativas para su disminución. Con los datos obtenidos para el CBEI del análisis exergético con base en los datos técnicos con los que se llevó a cabo la selección del fluido se determinó que la mayor destrucción de exergía se genera en la turbina y este resultado presentó una diferencia a lo presentado en la literatura donde la mayor exergía destruida se presenta en el evaporador, en nuestro caso de análisis en el intercambiador de calor. Esta incongruencia se presentó al considerar una eficiencia isentrópica del 50% en la turbina.

Se presentó diferentes escenarios con la variación de los parámetros más representativos que afectan en el intercambiador de calor y la turbina los cuales fueron la eficiencia isentrópica, la presión de condensación y el acercamiento en el intercambiador. En los resultados se observó que la eficiencia exergética del ciclo es más sensible a la variación de la eficiencia isentrópica de la turbina en comparación a los otros dos parámetros. A medida

#### 4. Análisis exergético



que la eficiencia isentrópica es cada vez mayor se observa una disminución en la exergía destruida.

Por su parte en la variación de la presión de condensación la disminución de exergía destruida se presenta al aumentar la presión de condensación pero afecta también a la eficiencia del ciclo con una disminución, en este caso es un escenario poco deseable. Para el acercamiento, la disminución de la destrucción de exergía se presenta a medida que el acercamiento es cada vez más grande; a medida que hay mayor adición de calor, hay mayor destrucción de exergía.



## Información adicional

En las últimas décadas, el ser humano ha entendido que los procesos industriales y la forma de vivir hoy en día no son compatibles con nuestro medio ambiente. Se ha tenido grandes problemas ambientales a causa de fenómenos naturales producidos por la alteración de los ecosistemas. Internacionalmente se ha hecho intentos desde finales del siglo pasado por regular y realizar cambios en los procesos industriales, en el área de la movilidad, entre otros, pero sin tener éxito en su totalidad.

Se ha determinado una serie de legislaciones con el objeto de forzar a las naciones a llevar a cabo sus compromisos con el cuidado del medio ambiente. Un ejemplo de ellos es el Protocolo de Montreal, el cual busca eliminar gradualmente aquellas sustancias que destruyan la capa de ozono. En materia de este protocolo existen sanciones monetarias para aquellas naciones que no cumplan sus compromisos.

Es imperativo conocer la legislación internacional pero sobre todo la legislación en México sobre el uso y regulación de los fluidos seleccionados y pueda llevarse a cabo la implementación de estos en el CBEI.

### Legislación en México para el uso de refrigerantes

El Protocolo de Montreal establecido el 16 de septiembre de 1987 establece protocolos para la eliminación y el control de las sustancias que agoten la capa de ozono y así evitar daños tanto al ambiente como a la salud. En este acuerdo tiene la participación internacional; México fue de los primeros países que ratificó su participación el 31 de marzo de 1988. En este acuerdo los países se comprometen a reducir y una eliminación gradual de las sustancias que contengan elementos que afecten al ozono como el caso de los CFCs y los HCFCs, todo esto apoyado con recursos del Fondo Multilateral del Protocolo de Montreal.

Las sustancias controladas estipuladas en el documento del Protocolo (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2000) son las siguientes:

- Clorofluorocarbonos (CFC)
- Halones
- Tetracloruro de carbono
- Metilcloroformo
- Hidroclorofluorocarbonos (HCFC)
- Hidrobromofluorocarbonos
- Metilbromuro
- Bromoclorometano



En México en la actualidad ha reducido en un 90% el uso de los CFCs, esto fue posible al reemplazar el refrigerante que utilizan los equipos de refrigeración así como implementando propelentes alternativos en aerosoles, entre otras medidas. De esta manera México se ha distinguido por cumplir con su compromiso ante la reducción del uso de dichas sustancias (SEMARNAT, 2013).

En el Protocolo de Kyoto es un acuerdo internacional donde los países industrializados se comprometen a disminuir sus emisiones de gases de efecto invernadero. Los gases de efecto invernadero estipulados en el documento son:

- Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ): provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles, combustión en automóviles y de la deforestación.
- Metano ( $\text{CH}_4$ ): proviene de los residuos orgánicos, del petróleo y del gas.
- Óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ): es producido por procesos biológicos en océanos y suelos, productos de la combustión.
- Hidrofluorocarbonos (HFC): son gases sintéticos utilizados para sustituir a los CFCs y se utilizan en la refrigeración, aire acondicionado, bombas de calor, extintores contra incendios, etc.
- Perfluorocarbonos (PFC): son comúnmente en el sector eléctrico, en la industria cosmética y farmacéutica. En el pasado se utilizaban en extintores contra incendios.
- Hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ): se emplea principalmente como gas aislante, como gas recubrimiento en la producción de magnesio y aluminio (Ministerio de Agricultura, s.f.).

En el protocolo de Montreal no hace referencia a una regulación para el uso del butano y el R245fa. México basa su normativa ante el agotamiento de la capa de ozono en este documento, pero en el protocolo de Kyoto si hacen referencia a una regulación para los Hidrofluorocarbonos, grupo donde pertenece el R245fa, por lo que podría causar conflictos al utilizarse esta sustancia. El R245fa es muy utilizado en ciclos *ORC* en el mundo y al ser ciclos cerrados, y si se asegura que este fluido no se liberará al ambiente, se podría conseguir un permiso para su utilización.

El butano será el fluido principal a utilizarse en el CBEI y es una sustancia con uso permitido en México y con disponibilidad.



## 5. Conclusiones

La energía geotérmica al ser una fuente “inagotable” de calor y al no depender de las condiciones climáticas se convierte en una alternativa factible para la generación de energía eléctrica haciendo uso de ciclos orgánicos y también para utilizarse en usos directos. México con las nuevas reformas energéticas, tendrá mayor impulso para la explotación de estos recursos.

Por su parte el CBEI como se pudo observar a lo largo del trabajo, no sólo es aplicable a sistemas geotérmicos, en la industria existe un gran desperdicio de energía remanente de los procesos industriales y es aquí donde se vuelve atractiva su implementación como parte de uso eficiente de la energía. También sería de gran ayuda su implementación en zonas que no disponen del servicio eléctrico, puesto que sólo sería conveniente la transmisión de energía a nivel sectorial ya que al transportar energía eléctrica a grandes distancias, hay una gran pérdida de carga.

Con respecto a los fluidos de trabajo seleccionados proveniente de la metodología de selección, el butano obtuvo el mejor desempeño, seguido por el R245fa. El butano obtuvo un 15.00% de eficiencia por segunda ley y el R245fa un 7.16%, valores con significativa diferencia entre ellos. Las ventajas que existen en utilizar el butano es que su impacto ambiental es bajo, tiene un valor de ODP nulo y un valor de GWP de 4, que significa los años que éste permanece en la atmósfera. El inconveniente es que es un fluido altamente inflamable por lo que su manejo tiene que ser con las medidas de seguridad adecuadas. Para el R245fa su ventaja es que tiene un valor nulo de ODP pero tiene un índice GWP muy superior al del butano, por lo que su contribución al efecto invernadero importante. Esta sustancia no es inflamable pero si es tóxica por las instalaciones donde se pretenda instalar el CBEI debe tener buenas condiciones de ventilación para evitar altas concentraciones. Se hace énfasis que el ciclo será cerrado y tendrá las condiciones de sellado adecuadas.

Con la información de los fluidos seleccionados, se proporcionó ésta a la empresa Especialistas en Turbopartes División Aeronáutica (ETU) para que se llevará a cabo la selección del tipo de microturbina que se utilizará en el CBEI solicitado por el Grupo IIDEA. Para su selección, el análisis requiere de dos parámetros adimensionales, el diámetro específico y la velocidad específica. Es necesario tener presente el fluido de trabajo para la selección de la microturbina ya que la velocidad específica es dependiente de la densidad del fluido.

Como material adicional se llevó a cabo un análisis exergético en el CBEI para identificar en donde se presenta la mayor generación de entropía y por tanto la mayor destrucción de exergía. En los equipos que mayor destrucción existió fue en el intercambiador de calor y en

## 5. Conclusiones



la turbina. Una vez identificado los dispositivos se procedió a evaluar la sensibilidad que tiene los parámetros más representativos en estos dispositivos en la eficiencia exergética del ciclo, teniendo como resultado que es más sensible a la variación de la eficiencia isentrópica de la turbina, esto utilizando los fluidos de trabajo seleccionados. Los otros parámetros fueron la presión de condensación y del acercamiento del intercambiador de calor, donde a medida que es menor el acercamiento, la exergía destruida aumenta pero también lo hace la eficiencia del ciclo. Para el caso de la presión de condensación a medida su valor es menor, la eficiencia del ciclo y la exergía destruida aumentan.



## Bibliografía

- A. Cengel, Y. & A. Boles, M., s.f. *Termodinámica*. s.l.:McGraw Hill.
- AFP, 2015. *La Capa de Ozono*, s.l.: s.n.
- Alatorre Frenk, C., 2009. Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. En: SENER: s.n.
- Arellano, V. M., Iglesias, E. & García, A., 2008. La Energía Geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura. *Boletín IIE*.
- ASHRAE Standard 34, 2007. *Designation and Safety Classification of Refrigerants*, s.l.: s.n.
- Aviña, H., 2015. *Presentación: Tipos de centrales geotermoeléctricas convencionales.*, México: s.n.
- Bastante, R., 2015. [En línea]  
Available at: [http://www.curriculumenlineamineduc.cl/605/articles-22748\\_recurso\\_jpg.jpg](http://www.curriculumenlineamineduc.cl/605/articles-22748_recurso_jpg.jpg)
- Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H. & Neu, T., 2014. *Handbuch Tiefe Geothermie*, s.l.: Springer Spektrum.
- Benítez Torreblanca, M. Á., 2015. *Instrumentación electrónica tolerante a fallas para el CBEI - IIDEA*. s.l.:Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bernal, M., 2014. *Propuesta de diseño para la construcción de un condensador para un ciclo "PWG" de 1 KWE*. México, D.F.: UNAM.
- Bertani, R., 2015. *Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report*, Melbourne: Proceedings World Geothermal Congress 2015.
- Bonilla, L. A. H., 2015. *Análisis y evaluación de dos dispositivos de estrangulamiento para la evaporación instantánea en un ciclo de generación Geotermoeléctrica*. s.l.:Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bo-Tau Liu, K.-H. C. C.-C. W., 2004. Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery. *ELSEVIER*.
- Bustamante, D. E., 2015. *Atlas visual de la Ciencia*. s.l.:EditorialSol90.
- Díaz, J. P., 2015. *Sistemas de energías renovables*. s.l.:Paraninfo.
- Dincer, I., Midilli, A. & Kucuk, H., 2014. *Progress in Exergy, Energy, and the Environment*. s.l.:Springer.
- DiPippo, R., 2007. *Geothermal Power Plants*. s.l.:BH.
- E.ON, 2008. *e.on*. [En línea]  
Available at: <http://www.eon.com/en/media/news/press-releases/2008/7/22/e-dot-on-starts-work-on-new-build-power-project-in-russia.html>
- El Banco Mundial, BIRF - AIF, 2015. *El Banco Mundial*. [En línea]  
Available at: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.GHGT.KT.CE/countries?display=map>
- Energiza.org, 2011. Especial Turbinas de Vapor. *Energiza.org*.
- Fucugauchi, J. U., 2011. *DGCS*. [En línea]  
Available at: [http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2011\\_766.html](http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2011_766.html)
- GREENHOUSE GAS PROTOCOL, 2007. *Global Warming Potentials*, s.l.: s.n.



## Bibliografía

- Gutiérrez Negrín, L. C., 2015. *Present Situation and Perspectives of Geothermal in Mexico*, Melbourne, Australia: Proceedings World Geothermal Congress 2015.
- Hiriart, G., 2011. *Tecnología de punta y costos asociados para generación distribuida, autoabastecimiento y cogeneración con recursos geotérmicos en México*, s.l.: Energy Sector Management Assistance Program.
- IIDEA, 2014. *Rediseño del mezclador de flujos*. México D.F.: IIDEA.
- INECC, 2015. *¿De dónde vienen los gases de efecto invernadero?*. [En línea]  
Available at: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/656/gases.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change, s.f. *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis*, s.l.: s.n.
- Klein, M., 1999. *Ein Beitrag zur Erfassung von Emissionen bei der thermischen Belastung von Polyurethanhartschäumen*. s.l.:Herbert Utz Verlag – Wissenschaft Munchen.
- Linde, 2006. *Refrigerants Environmental Data. Ozone Depletion and Global Warming Potential*, Pullach, Germany: s.n.
- Li, Y., 2012. *Analysis of Low Temperature Organic Rankine Cycles for Solar Applications*. s.l.:Lehigh University.
- Llopis Trillo, G. & Angulo, V. R., 2015. *Guía de la energía Geotérmica*. [En línea]  
Available at: <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-de-la-energia-geotermica.pdf>
- Madhawa, H., Golubovic, M., Worek, W. & Ikegami, Y., 2006. *Optimum desing criteria for an Organic Rankine cycle using low - temperture geothermal heat sources*, s.l.: ELSEVIER.
- Mario Invernizzi, C., 2013. *Closed Power Cycles*. Brescia: Springer.
- Ministerio de Agricultura, A. y. M. A., s.f. [En línea]  
Available at: [magrama.gob.es](http://magrama.gob.es)
- Monroy, J. P. P., 2012. *Los refrigerantes y medio ambiente*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya. Facultad de Náutica de Barcelona..
- Muffler, L., 1978. *Assessment of Geothermal Resources of the United States 1978*, s.l.: Geological Survey Circular 790.
- OpenEI, 2016. *OpenEI*. [En línea]  
Available at: [http://en.openei.org/wiki/Fenton\\_Hill\\_HDR\\_Geothermal\\_Area](http://en.openei.org/wiki/Fenton_Hill_HDR_Geothermal_Area)
- Poling, B. E., s.f. The properties of Gases and Liquids. En: s.l.:McGraw-Hill, p. 724.
- Pous, J. & Jutglar, L., 2004. Origen de la energía Geotérmica y sus mecanismos de propagación de calor. En: *Energía Geotérmica*. Barcelona: Ediciones Ceac, pp. 33 - 35.
- Power Technology, 2013. *power-technology*. [En línea]  
Available at: <http://www.power-technology.com/features/feature-giga-projects-the-worlds-biggest-thermal-power-plants/>
- PRO MÉXICO, 2015. *Industria de Energías Renovables Prospectiva y Oportunidades de Negocios en México*, s.l.: Unidad de Inteligencia de Negocios 2015.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2000. *Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agoten la capa de ozono*, s.l.: s.n.
- Quoilin, S., 2013. *Techno - economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems*. s.l.:ELSEVIER.



- Ramos Castellanos, P., 2010. *El Hombre y el Medio Ambiente*, Salamanca: Ediciones Universidad de Salamanca.
- REN21, 2015. *Renewables 2015 Global Status Report*, s.l.: REN21.
- Requena, G., 2015. Un potencial poco desarrollado. *Energía Geotérmica. Bicentenario*, pp. 11-14.
- Rodger W., G. J., 1974. *Química orgánica moderna*. España: REVERTÉ.
- Rodríguez, E. F., 2013. *Propuesta de diseño de un intercambiador de calor de placas para el ciclo PWG*. México: UNAM.
- Russell, B., 2016. *Análisis de factibilidad del sistema de enfriamiento de una planta geotérmica CBEI de 10 kW, con base a un aerocondensador o condensación con agua de mar*. DF: UNAM.
- Saadatfar, B., Fakhrai, R. & Fransson, T., 2013. *Waste heat recovery Organic Rankine cycles in sustainable energy conversion: A state-of-the-art-review*, s.l.: MACROJOURNALS.
- Secretaría de Energía Argentina, 2015. *Energía Geotérmica*. [En línea]  
Available at: [www.energia.gov.ar](http://www.energia.gov.ar)
- SEMARNAT, 2013. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. [En línea]  
Available at: [semarnat.gob.mx](http://semarnat.gob.mx)
- SENER, 2009. *Unidades Generadoras en Operación, 2008, Sistema Eléctrico Nacional (Servicio Público), 20° Edición*, s.l.: s.n.
- SENER, 2012. *Programa Especial para el Aprovechamiento de Energía Renovables*, s.l.: s.n.
- SENER, 2013. *Foro Internacional sobre Energía Geotérmica*, s.l.: s.n.
- SENER, 2013. *Inventario Nacional de Energías Renovables*, s.l.: s.n.
- SENER, 2015. *Prospectiva del Sector Eléctrico 2015 - 2029*, México: SENER.
- SENER, 2016. *Sistema de Información Energética*. [En línea]  
Available at: <http://sie.energia.gob.mx/>
- Sierra, K., 2014. *Diseño y construcción de un separador de flujos para un ciclo de generación geotermoeléctrica*. México: UNAM.
- Taiao, T. M. R., s.f. *Ozone-depletion substances regulated by the Ozone Layer Protection Act 1996*. *Environmental Protection Authority*, s.l.: s.n.
- Tarback, E. J. & Lutgens, F. K., 2005. *Ciencias de la Tierra*. Madrid: Pearson.
- Tejeda, B. U. R., 2012. *Selección y análisis de sistema de separación para la implementación en el ciclo PWG.*, s.l.: IIDEA.
- U.S. Department of Energy, 2010. *Geothermal Energy Production with Co-produced and Geopressured Resources*. [En línea]  
Available at: <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47523.pdf>
- UNEP-GRID-Arendal, 2015. *Efecto Invernadero*, s.l.: s.n.
- Velásquez, Á. M., 2008. *La tecnología de fluidos supercríticos, un proceso limpio para el sector industrial*, s.l.: Producción + Limpia.
- Velilla, J. P. D., 2015. *Sistemas de Energía Renovables*. s.l.:Paraninfo.



## Bibliografía

W. Lund, J. & L. Boyd, T., 2015. *Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review*, Melbourne, Australia: Proceedings World Geothermal Congress 2015.

Zhejiang se China fluorine chemical Co., s.f. *Datasheet HC-603 (NEOPENTANE R603)*. [En línea]  
Available at: [http://www.jhr22.com/en/product\\_307.aspx](http://www.jhr22.com/en/product_307.aspx)